

**DISEÑO DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES PARA APOYAR
ACTIVIDADES DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN EL JARDIN
BOTANICO DE CALI**

**FABIÁN ALFONSO GONZÁLEZ PAZMÍN
WILLIAM ALIRIO MOSQUERA LUNA
GERMÁN DAVID USECHE OSPINAL**

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERIAS
DEPARTAMENTO DE AUTOMÁTICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES
SANTIAGO DE CALI
2013**

**DISEÑO DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES PARA APOYAR
ACTIVIDADES DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN EL JARDIN
BOTANICO DE CALI**

**FABIÁN ALFONSO GONZÁLEZ PAZMÍN
WILLIAM ALIRIO MOSQUERA LUNA
GERMÁN DAVID USECHE OSPINAL**

**Proyecto de grado para optar el título de
Ingeniero Electrónico y Telecomunicaciones**

**Director
Diego Martínez Castro
Ingeniero Electrónico**

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERIAS
DEPARTAMENTO DE AUTOMÁTICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES
SANTIAGO DE CALI
2013**

Nota de aceptación:

Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Occidente para optar al título de Ingeniero Electrónico y Telecomunicaciones

HELMUNT RUBIO

Jurado

CESAR MARINO ROJAS

Jurado

Santiago de Cali, 10 de Mayo de 2013

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis está dedicada principalmente a nuestros padres y seres queridos, GENARO GONZALEZ, MARIA ELIZABETH PAZMIN, CAROLINA GOMEZ (FABIAN GONZALEZ); GERMAN USECHE, ESTELA OSPINAL (GERMAN DAVID USECHE); ALIRIO MOSQUERA, EMELINA LUNA, ELISA MOSQUERA (WILLIAM ALIRIO MOSQUERA) quienes nos han apoyado para llegar a esta instancia de nuestros estudios, ya que ellos siempre han estado presentes para apoyarnos moral y psicológicamente.

Agradecemos a nuestro director de trabajo de grado el ingeniero DIEGO MARTINEZ CASTRO por ayudarnos realizar este proyecto con su asesoría y por facilitarnos los medios necesarios para llevarlo a cabo, en cada objetivo trazado.

Al ingeniero CESAR MARINO ROJAS por sus asesorías brindadas como coordinador de este proyecto, las cuales fueron de vital importancias para el desarrollo del mismo.

Al ingeniero CARLOS ANDRES AGUILAR CARO egresado de la universidad Autónoma de Occidente, por su apoyo y aporte brindado en la realización de este proyecto.

A la doctora MARISOL GORDILLO profesora de probabilidad y estadística de la facultad de ciencias básicas por orientarnos al inicio del proyecto en asesoría y generosamente brindarnos gran parte de su tiempo.

Al grupo de investigación en estudios ambientales para desarrollo sostenible GEADES por su colaboración en las salidas de campos y el brindarnos información necesaria para el desarrollo de esta tesis.

CONTENIDO

	Pág.
1. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	16
1.1. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	17
1.2. CONTRIBUCIONES	17
2. CONTENIDO DE LA TESIS	19
3.1. MARCO TEÓRICO	20
3.2. REVISIÓN DEL ESTADO ACTUAL DE LAS TECNOLOGÍAS DE REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES EN APLICACIONES AGRÍCOLAS Y MEDIOAMBIENTALES	20
3.2.1. Aplicaciones de las redes inalámbricas de sensores y actuadores	20
3.2.2. Aplicaciones en el sector agrícola	20
3.2.3. Aplicaciones en el sector medioambiental.	22
3.3. PROTOCOLOS DE COMUNICACIONES PARA WSN	23
3.4. ARQUITECTURA DE LOS NODOS DE WSN	28
3.5. TECNOLOGÍAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA BASE DE DATOS	29
4. DISEÑO DE LA RED DE SENSORES	31
4.1. DESCRIPCIÓN DEL ESTÁNDAR 802.15.4	31
4.1.1. Tipos de dispositivos.	33
4.2. ARQUITECTURA DEL PROTOCOLO IEEE 802.15.4	34
4.2.1. Subcapa de control de enlace lógico IEEE 802.2 (LLC, LOGICAL LINK CONTROL).	34
4.2.2. Subcapa MAC.	35
4.2.3. Formato de tramas MAC	35
4.2.4. Otras características MAC	37
4.3. TOPOLOGÍAS DE UNA RED ZIGBEE	38

4.4. DISEÑO DE LA RED DE SENSORES PARA MONITOREO AMBIENTAL	39
4.4.1. Diseño de la red	40
4.4.2. Inicio de la red Zigbee	48
4.5. CAPTURA DE TRAMAS EN RED	50
4.6. IMPLEMENTACIÓN DE ACCIÓN DE CONTROL EN LA RED DE SENSORES	53
4.7. SIMULACIÓN DE LA RED	55
5. DISEÑO DEL NODO DE LA RED DE SENSORES	64
5.1 ALIMENTACIÓN DEL NODO	64
5.2. SELECCIÓN DE VARIABLES Y REQUERIMIENTOS	65
5.3. DISEÑO DEL NODO	65
5.3.1. Selección del sensor	66
5.3.2. Selección del microcontrolador Diseño1	68
5.3.3. Desarrollo del diseño	
5.3.4. Selección del microcontrolador del diseño 2	80
5.3.5. Simulación diseño 2	81
6. KRIGING	84
6.1 MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DEL KRIGING	85
6.2 ELECCIÓN DEL MÉTODO DE ESTIMACIÓN	85
6.2.1 Análisis del KRIGING ordinario	85
6.2.2 Representación de predicciones	89
6.3 IMPLEMENTACION DE ALGORITMO DE ESTIMACION	90
7. DISEÑO DE LA BASE DE DATOS E INTERFACE WEB	98
7.1 MODELOS DE BASES DE DATOS	98
7.2 TIPOS DE BASES DE DATOS	98
7.3 Diseño de la base de datos	99
7.4 DISEÑO PÁGINA WEB	101

8. CASO DE ESTUDIO	106
8.1 ESTIMACIÓN DE VARIABLES POR KRIGEAJE EN CASO DE ESTUDIO	112
9. CONCLUSIONES	119
10. TRABAJO FUTURO	121
BIBLIOGRAFÍA	122
ANEXOS	127

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Escenario del proyecto	15
Figura 2 Imagen de uno de los nodos utilizados en el proyecto LOFAR-Agro	21
Figura 3 Imágenes del proyecto The Great Duck Island. (Tomado de: Martha Baer, The Ultimate on-the-fly network. Wired Magazine, 11.12, Dec. 2003	23
Figura 4 Pila de protocolo Zigbee	32
Figura 5 Arquitectura IEEE 802.15.4	34
Figura 6 Forma general de las tramas MAC [10]	37
Figura 7 Topologías de red	38
Figura 8 Área de estudio – jardín botánico	41
Figura 9 Distancia entre nodos con obstáculos	42
Figura 10 Ubicación de nodos en plano de coordenadas	43
Figura 11 Sector circular	44
Figura 12 Despliegue de la red en zona de monitoreo	47
Figura 13 Esquema de Envío de Beacon, Asociación y Envío de Datos	49
Figura 14 Baliza emitida por el nodo para determinar si ya existe un coordinador	50
Figura 15. Baliza enviada por el router y respuesta del coordinador	51
Figura 16 Asociación router- coordinador	51
Figura 17 Vinculación del router al coordinador	52
Figura 18 Paquete de datos enviado por un dispositivo final y confirmación ack a nivel MAC	53
Figura 19 Trama de control y ACK	55
Figura 20 Librería de bloques – TRUETIME 2.0	57
Figura 21 Parámetros del bloque –True Time Wireless network	58
Figura 22 Modelo de bloques – simulink de red inalámbrica	59
Figura 23 Topología del modelo de bloques - simulink en True Time	60
Figura 24 Acciones en capa de AODV	62
Figura 25 Tiempos de envío de los nodos	63
Figura 26 Alimentación del Nodo2	64
Figura 27 Arquitectura general del nodo de la WSN	65
Figura 28 Conexión típica del sensor SHT71 al microcontrolador	68
Figura 29 Diagrama de bloques con la organización interna del CC2530.	70

Figura 30 Diagrama de bloques con la organización interna del MC 13233.	71
Figura 31 Organización interna del microcontrolador PIC18F46J13. [26]	74
Figura 32 Diseño del Nodo en Eagle (Impreso)	77
Figura 33 Diseño del Nodo 1 en Eagle (Esquemático)	77
Figura 34 Diagrama de bloques del diseño 2	80
Figura 35 Simulación del nodo 2 (Proteus)	81
Figura 36 Diseño del nodo 2 en Eagle (Impreso)	82
Figura 37 Diseño del Nodo 2 en Eagle (Esquemático)	82
Figura 38 Distribución de muestras	90
Figura 39 Estimación de la temperatura	92
Figura 40 Visualización de temperaturas estimadas – Workspace MATLAB	94
Figura 41 Varianza de los datos estimados	95
Figura 42 Estimación de temperatura con todos nodos	96
Figura 43 Varianza de temperatura con todos los nodos	97
Figura 44 Diagrama entidad - Relación	99
Figura 45 Interfaz técnica para consultas en Java (Netbeans)	100
Figura 46 Base de datos	101
Figura 47 Configuración del equipo estación base (servidor web)	102
Figura 48 Configuración del equipo de usuario 1 conectado a la red LAN	103
Figura 49 Configuración del equipo de usuario 2 conectado a la red LAN	103
Figura 50 Comprobación del funcionamiento de la página web desde otro computador para consultas	104
Figura 51 Resultados de la consulta desde el computador conectado a la red LAN con el computador servidor o estación base	105
Figura 52 Estación Base y Nodo Coordinador	107
Figura 53 Nodo router	108
Figura 54 Dispositivo final calibrado	109
Figura 55 Comunicación de valor de potenciómetro del dispositivo final a coordinador	110
Figura 56 Variación del valor del potenciómetro	111
Figura 57 Acción de control generada	112
Figura 58 Área a monitorear	113
Figura 59 Ubicación de los nodos.	113
Figura 60 Ubicación de los nodos aumentada	114
Figura 61 Estimación de temperaturas	115
Figura 62 Variograma de las temperaturas	115
Figura 63 Estimación de humedad	116
Figura 64 Variograma de humedad	117

LISTADO DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1 Comparación entre tecnologías inalámbricas	27
Cuadro 5. Microcontroladores de texas instruments	69
Cuadro 6 Microcontroladores de microchip	73
Cuadro 7. Comparación de los microcontroladores elegidos por cada empresa	75
Cuadro 8. Comparación xbee.	79
Cuadro 9 comparación de los microcontroladores por familia	80

LISTA DE ANEXOS

Anexo A: Conceptos de instrumentación	127
Anexo B. Métodos de estimacion geoestadística.	130

GLOSARIO

ACK: del inglés *acknowledgement*, en español acuse de recibo, en comunicaciones entre computadores, es un mensaje que el destino de la comunicación envía al origen de ésta para confirmar la recepción de un mensaje.

BEACON: es una trama que enviamos a la red un indicativo de estación, posición y algún dato más de interés (señal guía).

Bases De Datos: es un conjunto de datos pertenecientes a un mismo contexto y almacenados sistemáticamente para su posterior uso.

FFD`S: del inglés full function device, dispositivos de funcionalidad completa.
GATEWAY: puerta de enlace.

Humedad Relativa: es la humedad que contiene una masa de aire, en relación con la máxima humedad absoluta que podría admitir sin producirse condensación, conservando las mismas condiciones de temperatura y presión atmosférica

HTML: hace referencia al lenguaje de marcado predominante para la elaboración de páginas web que se utiliza para describir y traducir la estructura y la información en forma de texto, así como para complementar el texto con objetos tales como imágenes

LAN: del inglés, local area network, red de área local.

MLME-ASSOCIATE: función de capa de enlace que permite conectar un dispositivo al solicitar una asociación con un coordinador.

MLME-RESET: función de capa de enlace para Restablecer la capa MAC

MLME-SCAN: función de capa de enlace que se utiliza para iniciar una búsqueda de canales en una lista dada de canales.

MLME-START: hace una petición para que el dispositivo empiece a usar una nueva configuración.

OSI: (en inglés, *Open System Interconnection*) es el modelo de red descriptivo, que fue creado por la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) en el año 1984. Es un marco de referencia para la definición de arquitecturas en la interconexión de los sistemas de comunicaciones.

Página Web: es un lenguaje declarativo de acceso a bases de datos relacionales que permite especificar diversos tipos de operaciones en ellas. Las páginas web pueden estar almacenadas en un equipo local o un servidor web remoto.

PLME-SET-TRX-STATE: función que solicita peticiones primitivas para cambia el estado de funcionamiento interno del transceptor.

Portabilidad: es la facilidad con que se puede transportar un dispositivo electrónico y está relacionado al peso y las dimensiones del equipo. A menor peso y dimensiones, más portable es el dispositivo.

PH del suelo: es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones hidronio $[H_3O^+]$ presentes en determinadas sustancias.

Php: es un lenguaje de programación de uso general de código del lado del servidor originalmente diseñado para el desarrollo web de contenido dinámico. Fue uno de los primeros lenguajes de programación del lado del servidor que se podían incorporar directamente en el documento HTML en lugar de llamar a un archivo externo que procese los datos. El código es interpretado por un servidor web con un módulo de procesador de PHP que genera la página Web resultante. PHP ha evolucionado por lo que ahora incluye también una interfaz de línea de comandos que puede ser usada en aplicaciones gráficas independientes. PHP puede ser usado en la mayoría de los servidores web al igual que en casi todos los sistemas operativos y plataformas sin ningún costo.

Resistencia en Pull Up: en electrónica se denomina *pull-up* a la acción de elevar la tensión de salida de un circuito lógico, a la tensión que, por lo general mediante un divisor de tensión, se pone a la entrada de un amplificador con el fin de desplazar su punto de trabajo(Pasivo).

Red: es un conjunto de equipos conectados entre sí por medio de dispositivos físicos llamados nodos que envían y reciben datos, con la finalidad de compartir información de manera Inalámbrico o cableada.

RFD: Del inglés reduce function device. Dispositivo de funcionalidad reducida.

SQL: SELECT QUERY LANGUAGE es un lenguaje declarativo de acceso a bases de datos relacionales que permite especificar diversos tipos de operaciones en ellas.

Stack pointer (registro de pila): un registro de pila es un registro de un CPU de computadora cuyo propósito es mantener la pista de la posición actual de la pila de llamadas. En una máquina de arquitectura basada en acumulador, éste puede ser un registro dedicado como el puntero de pila.

Transceiver: es la posibilidad de emitir una señal en particular, permitiendo la emisión de señales en una ida y vuelta de la comunicación, pero no al mismo tiempo entre los dos terminales que intervienen.

Watchdog: es un mecanismo de seguridad que provoca un reset del sistema en caso de que éste se haya bloqueado.

Wireless: (inalámbrico o sin cables) es un término usado para describir las telecomunicaciones en las cuales las ondas electromagnéticas (en vez de cables) llevan la señal sobre parte o toda la trayectoria de la comunicación.

WPAN: Wireless Personal Area Networks, Red Inalámbrica de Área Personal o *Red de área personal* o *Personal area network* es una red de computadoras para la comunicación entre distintos dispositivos (tanto computadoras, puntos de acceso a internet, teléfonos celulares, PDA, dispositivos de audio, impresoras) cercanos al punto de acceso. Estas redes normalmente son de unos pocos metros y para uso personal.

WSN: Del inglés Wireless sensor network.

Zigbee: es el nombre de la especificación de un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radiodifusión digital de bajo consumo, basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (*wireless personal area network*, WPAN). Su objetivo son las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías.

RESUMEN

Las redes inalámbricas de sensores constituyen una de las tecnologías más importante al discutirse sobre proyectos que requieran generar soluciones a problemas tales como alertas sobre el control de variables ambientales, la medicina, el manejo de zonas de alta seguridad, domótica, etc.

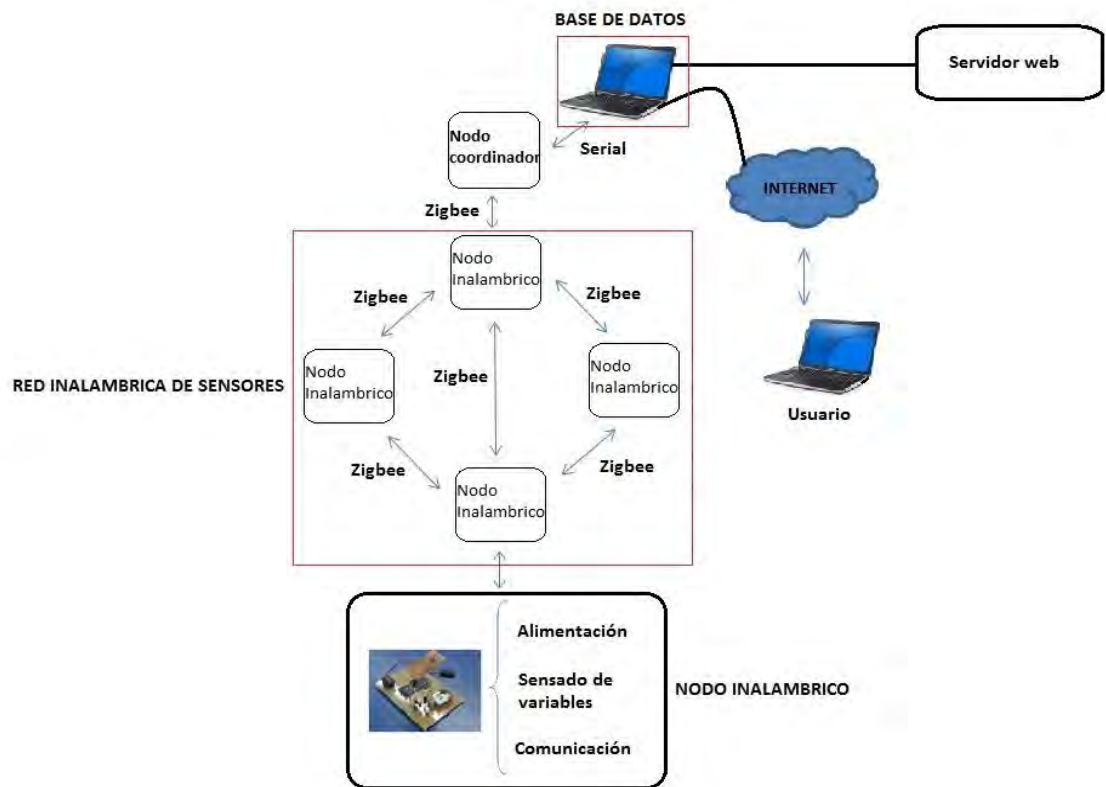
El uso de esta tecnología está haciéndose cada vez más común dadas sus características que ayudan a su fácil adquisición y manipulación, unas de ellas son su bajo coste, su facilidad de despliegue al utilizarse en grandes extensiones, y el hecho de ser autoconfigurables y de bajo consumo provee un gran dinamismo y autonomía a la red.

En este trabajo se desarrolló una red de sensores para monitorear variables ambientales en grandes extensiones y espacios abiertos. Esta solución puede ser utilizada en ambientes agrícolas para obtener el máximo rendimiento de cultivos, y en aplicaciones medioambientales para contribuir a abordar problemáticas tales como la prevención y el control de incendios forestales.

El escenario de la aplicación desarrollada en este trabajo se presenta en la Figura 1. Se aprecian varios nodos ubicados sobre el área de interés, los cuales realizan medidas y las transmiten a un computador central. En el computador se dispone de aplicaciones software que permiten estimar valores de las variables en lugares intermedios a los nodos y llevar esta información a Internet desde donde puede ser consultada por diversos usuarios.

Palabras Claves: Tecnologías, control de variables ambientales, domótica, sensores

Figura 1 Escenario del proyecto



Para abordar la solución al problema propuesto se desarrolló un prototipo de nodo, el cual contiene una serie de características como el sensado de las variables ambientales seleccionadas y su transmisión a través de la red, para su envío a la base de datos la cual recibe dicha información y permite las consultas de los datos almacenados a través de web.

El sistema desarrollado hace uso de métodos geoestadísticos para la estimación de las variables ambientales, esto a partir de mediciones puntuales de los nodos que se encuentran ubicados estratégicamente en la zona.

1. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

La naturaleza y complejidad de las nuevas aplicaciones de monitorización y control, junto con los nuevos avances en miniaturización, la comunicación ubicua y la convergencia digital, han impulsado a la distribución de estas aplicaciones entre diferentes sistemas empujados separados geográficamente, denominados nodos, los cuales se comunican a través de redes de comunicaciones y cooperan para la solución de problemas específicos.

Desde finales de la década de los 90 ha surgido un gran interés por el uso de redes inalámbricas para la interconexión de los nodos, permitiendo concebir nuevas aplicaciones que anteriormente eran poco viables debido a limitaciones en la portabilidad de la aplicación, la movilidad de los nodos y la autoconfiguración del sistema.

Inicialmente se desarrollaron aplicaciones de monitorización, dando origen al término redes de sensores inalámbricas (*Wireless Sensors Networks* - WSN). Posteriormente los nodos fueron dotados de interfaces de actuación, dando origen a las redes inalámbricas de sensores y actuadores (*Wireless Sensors and Actuators Networks* - WSAN).

En la actualidad hay una fuerte investigación en el campo de las redes de sensores inalámbricas, debido a las grandes ventajas que supone su uso en diversos campos. Se ha producido una constante evolución en el mundo, pudiendo llegar a encontrar en el mercado dispositivos de tamaño y coste reducido, y con un bajo consumo de energía.

En esta tesis se han realizado varias aportaciones orientadas a establecer una solución para la monitorización y el control de variables ambientales en grandes extensiones y espacios abiertos. Esta solución puede ser utilizada en ambientes agrícolas para obtener el máximo rendimiento de cultivos, y en aplicaciones medioambientales para contribuir a abordar problemáticas tales como la prevención y el control de incendios forestales.

Los nodos diseñados en este proyecto permiten medir la temperatura y la humedad del ambiente, además de poder reportar su nivel de batería. Estos datos se muestrean y transmiten a una estación central, en la cual son almacenados dentro de una base de datos para su posterior procesamiento y análisis, permitiendo al usuario el acceso a los datos y el establecimiento de los criterios de análisis.

1.1. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

El objetivo general de la tesis es diseñar una red de sensores y actuadores para aplicaciones de agricultura de precisión en espacios abiertos y grandes extensiones, tomando como caso de estudio el jardín botánico de Cali.

Para abordar el objetivo general se enfatizó en los siguientes aspectos:

- Identificación de las necesidades y requisitos de las aplicaciones de redes de sensores y actuadores orientadas a procesos agrícolas.
- Selección de las variables a controlar en el caso del Jardín Botánico de Cali.
- Seleccionar y acondicionar los sensores y actuadores adecuados, para regular las variables identificadas.
- Determinar la topología de red más adecuada para implementar en el caso de estudio.
- Diseñar e implementar un prototipo de nodo de la red.
- Seleccionar e implementar los algoritmos de estimación y control de las variables identificadas.
- Diseñar e implementar un centro de control, para intercambio información con la red.
- Validar el diseño realizado.

1.2. CONTRIBUCIONES

La principal contribución de este trabajo de grado consiste en el desarrollo de una solución para la monitorización y el control de variables ambientales en grandes extensiones y espacios abiertos.

En los distintos ámbitos, las contribuciones que aporta este trabajo se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Diseño e implementación del nodo de la red de sensores para la monitorización de temperatura y humedad relativa en aplicaciones agrícolas y medioambientales.
- Diseño y validación de la red de sensores para la monitorización de variables ambientales en grandes extensiones y espacios abiertos.
- Selección e implementación del algoritmo de estimación.

- Implementación de una estrategia de actuación para la regulación de variables, en función del establecimiento de niveles aceptables de las variables en el nodo coordinador de la red.
- Diseño e implementación de un centro de monitorización y control a través de Web.

2. CONTENIDO DE LA TESIS

Este proyecto incluye diferentes tópicos que son desarrollados simultáneamente. En el segundo capítulo se detalla el escenario del proyecto y se explican los tipos de dispositivos utilizados en la aplicación de redes de sensores inalámbricos.

Seguidamente, en el tercer capítulo se citan los principales parámetros y características del estándar de comunicaciones para el desarrollo de la comunicación de datos entre módulos en la red de sensores y la forma en que se implementaron.

En el cuarto capítulo se presenta el diseño del nodo de red desarrollado para monitorear las variables ambientales en espacios abiertos.

En el quinto capítulo se presenta el algoritmo de estimación seleccionado y la forma en que fue utilizado en la aplicación desarrollada.

En el sexto capítulo se explica el desarrollo de la aplicación para almacenar y gestionar las mediciones realizadas por los nodos, adicionalmente se presenta la exportación de los datos al software implementado para la aplicación del algoritmo de estimación geoestadístico, el cual determina los datos en posiciones no sensadas del área de interés.

En el séptimo capítulo se exponen los casos de estudio que validan la solución propuesta, y se presentan las pruebas realizadas en la recolección y visualización vía web de los datos obtenidos para su posterior análisis en la base de datos creada.

Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas en el desarrollo de este trabajo.

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1. MARCO TEÓRICO

3.2. REVISIÓN DEL ESTADO ACTUAL DE LAS TECNOLOGÍAS DE REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES EN APLICACIONES AGRÍCOLAS Y MEDIOAMBIENTALES

La arquitectura de los nodos y de la red que conforman estas aplicaciones, está directamente influenciada por el cumplimiento de las restricciones impuestas por la aplicación. Esto conlleva el análisis de diferentes aspectos que influyen en la realización de un diseño adecuado, como protocolos de redes de comunicaciones inalámbricas, nodos de redes de sensores inalámbricas, y tecnologías para la implementación de bases de datos y aplicaciones Web.

En este capítulo se realiza una caracterización de las aplicaciones de WSN, y se analizan los trabajos relacionados en las temáticas mencionadas.

3.2.1. Aplicaciones de las redes inalámbricas de sensores y actuadores.

Las arquitecturas de los nodos dependen altamente de la aplicación a la cual están dirigidos y de la función que cumpla cada uno dentro de la misma. Por esta razón en esta sección se realiza un análisis de los requisitos de las aplicaciones de WSN en contextos agrícolas y medioambientales¹

3.2.2. Aplicaciones en el sector agrícola. Las WSN pueden contribuir a analizar el estado de un cultivo por medio de la monitorización y el análisis regular de las condiciones fisiológicas de las plantas en sitios específicos, como también vigilar el estado del suelo obteniendo mediciones sobre propiedades químicas (cantidad de nutrientes, presencia de minerales como el nitrógeno, fosforo, potasio, calcio, azufre, magnesio, hierro, cobre o aluminio, niveles de pH para medir acidez o basicidad, etc.), propiedades físicas (porosidad del suelo, densidad), o su capacidad de campo (disponibilidad de agua, pérdidas por escorrentía e infiltración, etc.).

¹ MORALES, R. (15 de FEBRERO de 2012). YOUTUBE. Recuperado el ABRIL de 2012, de Netbeans Mostrar y Filtrar datos a MySql Java Video 3: <http://www.youtube.com/watch?v=xuO94ROMCsE>

De igual forma, el uso de WSN facilita el análisis de la biota, es decir, todo el conjunto de especies de plantas, animales y otros organismos encontrados en el cultivo.

Adicionalmente, se puede recopilar información sobre diversas variables climáticas, como temperatura, precipitación, humedad, horas luz, niveles de radiación, viento y evaporación.

Esta información posibilita el desarrollo de pronósticos sobre la presencia de plagas y el rendimiento del cultivo. Es este tipo de disponibilidad de información para sitios particulares en instantes de tiempo específicos, lo que hace posible evaluar densidades óptimas de siembra, estimar cantidad óptima de fertilizante y predecir la producción en cada punto del cultivo. A esto se le conoce como agricultura de precisión, es decir, la posibilidad de observar, medir y controlar las prácticas agrícolas con diferenciación entre distintas partes de un mismo cultivo.

En el proyecto LOFAR-Agro, figura 2, se desarrolló una WSN de aproximadamente 100 nodos para una aplicación de agricultura de precisión. Por medio de la medición de humedad y temperatura, se pretendía detectar el momento propicio para combatir las fitóftoras en los cultivos de papa. Los resultados experimentales mostraron que el crecimiento del cultivo reduce drásticamente el radio de cobertura de los dispositivos de comunicaciones y afecta el desempeño de la aplicación².

Figura 2 Imagen de uno de los nodos utilizados en el proyecto LOFAR-Agro



² MARTINEZ, D., SIMO, J., Blandes, F., & Crespo, A. (2009). Wireless Sensor and Actuator Networks: Characterization and Cases study for Confined Spaces Healthcare and control Applications. Scalable Computing: Practice and Experience, Scientific International Journal for Parallel and Distributed Computing, 291-305, Volume 10, no.3 <http://www.scpe.org>. ISSN: 1895-1767. September, 2009

En³ se describe una aplicación de WSN para el cultivo de repollos en la región semiárida de Murcia, la cual permite medir las diferentes características del suelo, tales como la temperatura, la humedad volumétrica y la salinidad. El sistema permite controlar con éxito el crecimiento de repollos ecológicos con la precisión requerida.

Otros proyectos relacionados son: GoodFood.

3.2.3. Aplicaciones en el sector medioambiental. En los últimos años se ha presentado un gran interés por el desarrollo de técnicas y estrategias que permitan disminuir el impacto medioambiental. La conservación de las fuentes de aguas o cuencas hidrográficas, la optimización del uso del agua, el control biológico de plagas, el manejo racional de los agroquímicos, el control de emisiones atmosféricas, etc., son temas de gran impacto en nuestra sociedad.

Las WSN posibilitan el desarrollo de aplicaciones orientadas a la continua monitorización de variables medioambientales en grandes extensiones de terrenos, lo que facilita actividades como la caracterización de cuencas hidrográficas, la detección de contaminantes, el análisis de condiciones microclimáticas, el estudio de factores de riesgo para especies en peligro, la monitorización de especies en vía de extinción, sistemas de detección, monitorización y control de incendios forestales, etc.

Algunos de los proyectos medioambientales abordados con WSN son:

- The Great Duck Island Experiment. Esta red de sensores, compuesta por más de 150 nodos, fue diseñada para sensar, de forma no invasiva, la ocupación de los nidos de una especie de pato y la incidencia de los microclimas en su hábitat. En la figura 3 se aprecian 5 tipos de dispositivos. Los biólogos ponen los nodos sensores en los nidos subterráneos (1) y sobre pilotes de 4 pulgadas colocados justo fuera de los nidos (2). Estos dispositivos registran los datos y los envían a un nodo *gateway* (3), que transmite la información a una computadora portátil en la estación de investigación (4), luego a través de una antena parabólica (5) la información es transmitida a un laboratorio en California.

³ LANGENDOEN, K., BAGGIO, A., & Visser, O. (2006). Murphy Loves Potatoes: experiences from a pilot sensor network deployment in precision agriculture. Parallel and Distributed Processing Symposium, 2006. IPDPS 2006. 20th International., 1-4244-0054-6.

Figura 3 Imágenes del proyecto The Great Duck Island. (Tomado de: Martha Baer, The Ultimate on-the-fly network. Wired Magazine, 11.12, Dec. 2003).



- *The Shared Wireless Infostation Model (SWIM)*. Por cuanto actualmente las ballenas y grandes mamíferos marinos se encuentran en peligro de extinción, este proyecto fue desarrollado para estudiar el impacto de los cambios medioambientales naturales y aquellos provocados por el hombre, en el comportamiento y movilidad de estas especies.⁴
- *The ZebraNet Wildlife Tracker*. Este proyecto se desarrolló con el objetivo de reunir datos sobre una amplia gama de especies de animales terrestres, con el fin de comprender sus interacciones y la influencia de una sobre otras. El objetivo era también comprender los patrones de la migración de esos animales salvajes, y la forma en que pueden verse afectados por cambios en los patrones climáticos y otros provocados por el hombre.⁵ Otros proyectos relacionados son: *WaterNet*, *Smart Mesh Weather Forecasting*, *GlacsWeb*, *Wireless Sensors for Wildfire Monitoring*.

3.3. PROTOCOLOS DE COMUNICACIONES PARA WSN

Aunque estas redes comparten algunas características con las redes inalámbricas tradicionales, en general ellas se diferencian en que:

⁴ MARTINEZ, D., SIMO, J., BLANDES, F., & Crespo, A. (2009). Wireless Sensor and Actuator Networks: Characterization and Cases study for Confined Spaces Healthcare and control Applications. *Scalable Computing: Practice and Experience, Scientific International Journal for Parallel and Distributed Computing*, 291-305, Volume 10, no.3 <http://www.scpe.org>. ISSN: 1895-1767. September, 2009.

⁵ Ibid,

- La conservación de energía es un factor prioritario en el diseño de protocolos para WSN.
- La topología de la red puede cambiar dinámicamente debido al movimiento de los nodos, por lo que estos podrían no tener un único identificador.
- Se pueden presentar casos en los que una WSN esté compuesta de un elevado número de nodos.
- Los datos generados en los nodos pueden estar relacionados con los datos de los nodos vecinos, lo cual puede ser aprovechado como estrategia para disminuir el consumo de potencia en la red, (Swami, 2007).

Las redes de sensores inalámbricas o WSN, básicamente consisten en una red inalámbrica de dispositivos autónomos más conocidos como nodos, los cuales hacen uso de sensores para medir las variables físicas del entorno en donde se encuentren ubicados, estas variables pueden ser humedad, sonido, temperatura, luz etc.

Entre sus principales características se encuentran:

- Transferencia de datos a 250Kb/S, 40Kb/S y 20Kb/S.
- Manejo de redes en estrella, árbol y malla.
- Direccionamiento corto con 16 bits y extendido con 64 bits.
- Bajo consumo de potencia.
- Escalabilidad.
- Indicadores de calidad en el enlace.

Se debe tener en cuenta que estas tecnologías están generalmente asociadas a protocolos de transmisión inalámbricos y a sistemas embebidos las cuales se determinan por características como la movilidad, el acceso a la información y la cooperación entre dispositivos. Actualmente el estándar de comunicación más utilizado para este tipo de redes es el IEEE 802.15.4 (ZigBee).

Los sistemas Bluetooth, Wi-Fi (IEEE 802.11) y Zigbee son las opciones más populares y comercialmente disponibles cuya utilización en redes inalámbricas de sensores ha sido evaluada.

3.3.1. Bluetooth. Bluetooth es un sistema diseñado como una red inalámbrica de área personal, su principal aplicación es la conexión de dispositivos a una computadora personal. Se han hecho prototipos de redes de sensores basadas en Bluetooth, los nodos organizados en picoredes (red formada por dos o más dispositivos Bluetooth) con un nodo maestro y un máximo de siete nodos

esclavos activos. El maestro elige la secuencia de saltos que deben seguir los esclavos. Puede haber varios nodos esclavos en estado pasivo en la picored, el maestro interroga los nodos esclavos activos continuamente.

Hay varios inconvenientes de la aplicación de Bluetooth a redes inalámbricas de sensores⁶

- La necesidad de tener un nodo maestro constantemente, con el costo de interrogar sus esclavos.
- La cantidad limitada de esclavos por picored que soporta.
- Para el caso de redes de sensores densas, se necesitaría un número enorme de nodos maestros.
- Un esclavo activo debe permanecer siempre encendido, ya que no puede predecir cuándo será interrogado por el maestro.
- Un esclavo pasivo debe postularse con el maestro para cambiar a activo, y si ya hay siete nodos activos, será rechazado.
- se requiere que cada nodo pueda asumir el rol de maestro o esclavo, agregando una complejidad considerable.
- Múltiples y rápidos saltos de frecuencia en la transmisión que requieren una sincronización estricta entre los nodos de la picored.

3.3.2. Wifi. La familia de estándares IEEE 802.11 (802.11a, 802.11b y 802.11g), más conocida como WiFi, tiene asignadas las bandas ISM (Industrial, Scientific and Medical) 902-928 MHz, 2.400-2.4835 GHz, 5.725-5.850 GHz para uso en las redes inalámbricas basadas en espectro ensanchado con objeto de lograr redes de área local inalámbricas (WLAN).

WiFi comparte la mayoría de su funcionamiento interno con Ethernet, sin embargo este difiere en la especiación de la capa física (PHY) utilizando señales de radio en lugar cable, adicionalmente para controlar el acceso al medio Ethernet usa CSMA/CD mientras que WiFi usa CSMA/CA. Wifi presenta el gran ancho de banda (entre 1 y 11 Mbps para 802.11b y hasta 54Mbps para 802.11a/g) a un precio reducido, como una de las mejores opciones para la transmisión de datos y redes de telefonía empleando VoIP (voz sobre IP).

⁶ GARBARINO, J. (s.f.). PROTOCOLOS PARA REDES INALAMBRICAS DE SENSORES.[en línea][consultado el 7 de Noviembre de 2012], Disponible en internet: <http://materias.fi.uba.ar/7500/Garbarino.pdf>

En términos generales, el estándar de protocolos IEEE 802.11 (WI-FI) tiene los siguientes inconvenientes ⁷

- Los nodos deben sobre-escuchar paquetes RTS y CTS para ajustar sus temporizadores adecuadamente.
- Si bien se proveen algunas funcionalidades de ahorro de energía, en general está orientado a altas tasas de transmisión, y los transceptores disponibles requieren una cantidad de energía que son órdenes de magnitud mayores que lo aceptable en aplicaciones de redes de sensores
- Es un protocolo de salto único para redes ad-hoc, cuando lo común en redes de sensores es el encaminamiento de salto múltiple.
- Tiene un número limitado de canales no interferentes, 3 en 2.4 GHz y 8 en 5.8 GHz

3.3.3. Zigbee/802.15.4. El estándar *IEEE802.15.4*, finalizado en el 2003 por el instituto de ingenieros Eléctrico y Electrónicos, definen la capa física y MAC para redes inalámbricas de área personal (WPAN) de baja tasa de transmisión. A veces se confunde el estándar con Zigbee, otro estándar que agrega servicios de red, seguridad y aplicación, y está basado en los servicios ofrecidos por IEEE 802.15.4. Los tipos de aplicación a los que está orientado este estándar comprenden las redes de sensores inalámbricos de sensores, la domótica, las redes hogareñas, la conexión de dispositivos a una computadora personal, seguridad, etc. La mayoría de estas aplicaciones requieren tasas de transmisión bajas, retardos de transmisión moderados con requerimientos no muy estrictos, y una reducción al mínimo del consumo de energía en los nodos.

Zigbee es un estándar de comunicación orientado a aplicaciones cuyos requerimientos principales son bajas tasas de transmisión, bajo costo y larga duración de baterías. Algunos sistemas para los que existen perfiles de aplicación definidos:

- Domótica
- Control remoto (home theatre, media center, etc)
- Monitoreo de consumo energético
- Monitoreo ambiental y en agricultura
- Monitoreo de pacientes crónicos no agudos, salud personal y de la tercera edad.

⁷ Ibíd.,

Los estándares ZigBee son desarrollados por la organización ZigBee Alliance, conformada por cientos de compañías, y formada en el 2002 como una organización sin fines de lucro. El estándar Zigbee está definido en las capas de protocolos, basadas en el modelo de referencia OSI. Adoptando la capa física (PHY) y de acceso al medio (MAC) IEEE 802.15.4, define capas de servicio de red, aplicación y seguridad.

El estándar de comunicación Zigbee ha sido desarrollado, entre otras cosas, para ser capaz de realizar comunicaciones de corto alcance y de bajo consumo. En el diseño de los nodos inalámbricos de la red para este proyecto se tuvo en cuenta este último factor, y por eso se diseñaron nodos soportados en este protocolo con el propósito de ahorrar el máximo de energía posible y así alargar su tiempo de vida de la aplicación.

Cuando el usuario requiera de los datos de los nodos inalámbricos, éste los recopilará mediante un nodo del mismo tipo al que llamaremos nodo coordinador o *gateway*. Este nodo se encargará de solicitarles los datos al resto de sensores, los recibirá mediante la interfaz radio, y por último los enviará por el puerto serie a un terminal (PC) donde serán procesados y alojados en una base de datos (BB.DD).

Cuadro 1 Comparación entre tecnologías inalámbricas

Estandar	ZigBee	Bluetooth	Wi-Fi
Especificación IEEE	802.15.4	802.15.1	802.11b
Propagación	DSSS	FHSS	DSSS
Max. Velocidad de transmisión	250 Kbps	3 Mbps	11Mbps
Nº máximo de nodos	250/65535	8	255
Latencia	30ms	Up to 10s	Up to 3s
Tipo de datos	Pequeños paquetes de datos	Audio graficos	Video, audio graficos
Topologías	Estrella, árbol, malla	Estrella	Estrella
Mecanismo de coexistencia	Selección dinámica de frecuencias	Salto adaptativo de frecuencias	Selección dinámica de frecuencias
Alcance	70-100	10-100	100
Duración de Baterías	100-1000 días	1 semana	12-48 horas
Precio	Bajo	Accesible	Costoso
Complejidad	Sencillo	Complejo	Complejo
Aplicación Principal	Control y monitorización	WPAN	WLAN
Memoria necesaria	4KB-32KB	250KB	1MB
Parámetros más importantes	Fiabilidad, bajo costo y bajo consumo	Costos y periles de aplicación	Velocidad y flexibilidad

3.4. ARQUITECTURA DE LOS NODOS DE WSN

Los nodos actuales se caracterizan por estar dotados de coprocesadores, los cuales permiten acelerar el procesamiento de ciertas funciones, tales como la comunicación y la protección de la información, al mismo tiempo que se logra un mejor balance entre el consumo de potencia y la eficiencia del sistema.

En el mercado se encuentran nodos sensores con procesadores de 8, 16 y 32 bits, dotados de interfaces para intercambiar información con el medio en el que se encuentran, para lo cual utilizan una gran variedad de sensores y actuadores, entre ellos de temperatura, luz, relés, presión barométrica, GPS, micrófono, fotorresistencia, termistores, aceleración, etc. Los nodos sensores más reportados en las aplicaciones son Mica2 Micaz TelosB Imote⁸

Actualmente algunos fabricantes como Microchip, Texas Instruments, Freescale y Atmel, ofrecen un conjunto amplio de dispositivos para abordar aplicaciones de WSN, entre ellos, procesadores de bajo consumo de potencia, transceptores y sistemas en chip, los cuales tienen interfaces asociadas para implementar los protocolos IEEE 802.15.4 y Zigbee, acceder a los dispositivos y gestionar tareas.

El parámetro más relevante dentro de las características de las WSN es el consumo de potencia. Debido a esto, en la selección de un procesador para este tipo de aplicaciones es necesario considerar el consumo de potencia tanto por sus características físicas (voltajes y corrientes requeridos en operación y en modos de bajo consumo), como de programación (modos de bajo consumo SLEEP/HALT/IDLE).

Los desarrollos se han orientado a la integración en un mismo chip de núcleos de procesadores existentes junto con coprocesadores e interfaces especializadas. Logrando, además de un mejor balance en cuanto al consumo de potencia y el tiempo de procesamiento, la disminución del coste, tamaño y tiempo de desarrollo de las aplicaciones. Tal es el caso de los dispositivos CC2431, CC2480 y CC2530 de Texas Instruments, el ATmega128RF de Atmel y el MRF24J40 de Microchip.

⁸ ALVAREZ, S. (s.f.). *DESARROLLO WEB*. [en línea][consultado el 2 de Octubre de 2012], Disponible en internet: <http://www.desarrolloweb.com/articulos/modelos-base-datos.html>

En lo que respecta a la protección de información, las restricciones de estos dispositivos en cuanto a la limitada capacidad de cómputo, bajo consumo de potencia y poca capacidad de almacenamiento, restringen la implementación de algoritmos complejos de seguridad. En IEEE 802.15.4 se establece un mecanismo de cifrado soportado en claves simétricas, las cuales son provistas por los niveles superiores (IEEE 802.15.4, 2006).⁹

Actualmente ya se han incorporado módulos hardware en los procesadores que facilitan el desarrollo de dichas funciones. Tal es el caso del coprocesador para implementar el *Advanced Encryption Standard* (AES), integrado en los CC2430, CC2431, CC2480 y CC2530 de Texas Instruments.

En el CC2431 también se ha incorporado un módulo especializado para abordar la problemática de la localización de nodos con base en algoritmos de triangulación.

3.5. TECNOLOGÍAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA BASE DE DATOS

Para el diseño y manejo de las bases de datos existen diferentes alternativas informáticas que se diferencian según características e ítems que ayudan a discernir la opción óptima.

Dentro de las opciones que se encuentran en el mercado y en la red hay unas bases de datos que sobresalen sobre las demás, entre ellas están Mysql Oracle, DBase, Microsoft Access.

Los requisitos de proyecto plantean la necesidad de que la base de datos sea compatible con otros programas, por lo cual se seleccionó Mysql, por ser fácil de administrar y soportar el modelo y tipo de base de datos que se seleccionaron con base en los requisitos del proyecto.

Mysql permite ser utilizado a través de su IDE, por el cual se debe pagar un coste para su uso en aplicaciones, o directamente utilizar sus comandos de programación para la conexión y operatividad de la base de datos.

⁹ EL ESTANDAR IEEE 802.15.4. (s.f.).[en línea] [consultado Octubre de 2012], disponible en internet:
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/archundia_p_fm/capitulo4.pdf

En el proyecto se decidió utilizar los comandos de SQL directamente desde Java, obteniendo de esta manera un desarrollo portable y abierto, ya que se usó el appserver que es una herramienta OpenSource en la cual se configuran las aplicaciones en forma automática.

Dentro de la solución propuesta para la problemática planteada, se debe realizar un sumidero o base de datos en el cual se van a almacenar todos los datos recopilados por la red inalámbrica de sensores. Este sumidero o base de datos fue programado en Java y Mysql por medio de la conexión de dos herramientas informática como lo son Netbeans y phpmyadmin.

La selección de estos programas para el diseño y funcionamiento de la base se dio ya que satisfacen características necesarias en la base, como son: la compatibilidad y facilidad de lectura del puerto serial por medio de Java; la compatibilidad entre Java y SQL para realizar la conexión con la base de datos; las búsquedas en la base por medio de una interfaz realizada en Java; la facilidad de consultas en las bases desde una página Web por medio de SQL y php.

El lenguaje que se utilizó para construir las consultas a bases de datos relacionales fue SQL, Structured Query Lenguaje o Lenguaje Estructurado de Consultas, el cual es un estándar implementado por los principales motores o sistemas de gestión de bases de datos relacionales.

4. DISEÑO DE LA RED DE SENSORES

Para el desarrollo de este proyecto se seleccionó el protocolo ZigBee principalmente por su bajo consumo de potencia, lo cual es muy importante en el tipo de aplicaciones consideradas en este proyecto, debido a que la ubicación de los nodos demanda largos intervalos de tiempo sin que estos puedan ser intervenidos.

El alcance de la señal de los nodos depende de la potencia de transmisión del dispositivo, así como también del tipo de antena utilizada (cerámica, dipolo, etc.). El alcance normal con antena dipolo, en línea vista, es de aproximadamente (tomando como ejemplo el caso de MaxStream, en la versión de 1mW de potencia) 100m y en interiores de unos 30m. La velocidad de transmisión de datos de una red ZigBee es de hasta 256kBps. Una red ZigBee (teóricamente) puede estar formada por un máximo de 65535 nodos. Las características que condujeron a la selección de Zigbee como protocolo de comunicaciones para el desarrollo de la solución propuesta en este proyecto son:

- Bajo coste económico.
- Menor consumo energético comparado con Wi-Fi y Bluetooth.
- Uso de bandas de radio libres y sin necesidad de licencias.
- Instalación económica y simple (No es necesaria mucha electrónica para implementarlo).
- Redes flexibles y extensibles.
- 65535 posibles nodos en comparación a los 8 de Bluetooth.

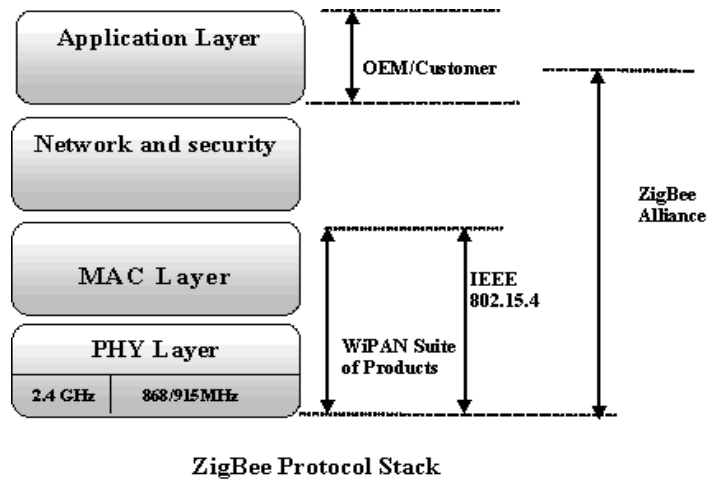
4.1. DESCRIPCIÓN DEL ESTÁNDAR 802.15.4

El estándar 802.15.4 está enmarcado dentro del ámbito de las redes inalámbricas de área personal y baja velocidad de transmisión. Este tipo de redes se caracteriza por su simplicidad y bajo costo, proporcionando conectividad inalámbrica en aplicaciones que requieren un consumo de potencia muy reducido.

Los términos “ZigBee” y “802.15.4” son, en general, usados de manera indistinta. Sin embargo este uso es incorrecto, ya que la norma IEEE 802.15.4 únicamente define las capas física y de control de acceso al medio para redes LR-WPAN. Como se muestra en la figura 4, *ZigBee* usa las capas PHY

(*Physical*) y MAC (*Medium Access Control*) del estándar 802.15.4 e implementa una solución propia para las capas de red, aplicación y seguridad.

Figura 4 Pila de protocolo Zigbee



El estándar 802.15.4 fue creado de manera independiente de *ZigBee*, dando opción a que los usuarios puedan desarrollar sus propias capas de red y aplicación, orientadas y optimizadas hacia las aplicaciones para las que se diseñan. Una ventaja que ofrece esta posibilidad es la de reducir la cantidad de memoria necesaria para cargar el protocolo, lo que puede implicar una reducción significativa de costes. Por el contrario, implementar una solución específica para estas capas hace que se pierda la interoperabilidad con redes y dispositivos que sí implementan el protocolo *ZigBee* completo.

En los siguientes apartados se va a tratar de dar una visión general de la norma IEEE 802.15.4, para adquirir los conocimientos necesarios para llevar a cabo la programación de la aplicación de que es objeto este proyecto de tesis. Adicionalmente, se destacarán los aspectos y funcionalidades más importantes de las capas que implementa el estándar *ZigBee*.¹⁰

¹⁰ AREVALO BRAZAS, S. (2011). programación de un nodo conmutador para la gestión remota de redes 802.15.4/ZIGBEE. MÁLAGA: Universidad de Málaga.España

4.1.1. Tipos de dispositivos. Se definen tres tipos diferentes de dispositivos ZigBee según su papel en la red:

- **Coordinador ZigBee (*ZigBee coordinator, ZC*).** El tipo de dispositivo más completo. Puede actuar como director de una red en árbol así como servir de enlace a otras redes. Existe exactamente un coordinador por cada red, que es el nodo que la inicia. Puede almacenar información sobre la red y actuar como su centro de confianza en la distribución de claves de cifrado.
- **Router ZigBee (*ZR*).** Además de ofrecer un nivel de aplicación para la ejecución de código de usuario, puede actuar como router interconectando dispositivos separados en la topología de la red.
- **Dispositivo final (*ZigBee end device, ZED*).** Posee la funcionalidad necesaria para comunicarse con su nodo padre (el coordinador o un router), pero no puede transmitir información destinada a otros dispositivos. De esta forma, este tipo de nodo puede estar dormido la mayor parte del tiempo, aumentando la vida media de sus baterías. Un ZED tiene requerimientos mínimos de memoria y es por tanto significativamente más barato.

Con base a su funcionalidad puede plantearse una segunda clasificación:

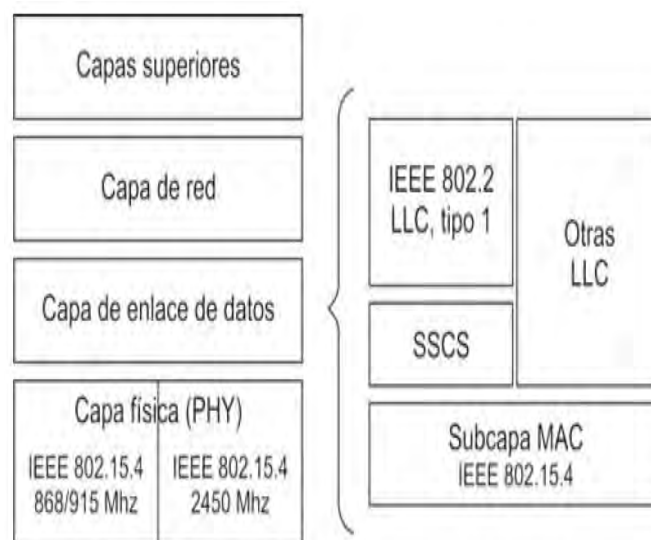
- **Dispositivo de funcionalidad completa (FFD):** es capaz de recibir mensajes en formato del estándar 802.15.4. Gracias a la memoria adicional y a la capacidad de computar, puede funcionar como coordinador o router o puede ser usado en dispositivos de red que actúen de interface con los usuarios.
- **Dispositivo de funcionalidad reducida (RFD):** tiene capacidad y funcionalidad limitadas (especificada en el estándar) con el objetivo de conseguir un bajo coste y una gran simplicidad. Básicamente, son los sensores/actuadores de la red.¹¹

¹¹ VALVERDE REBAZA, J. (2007). El estandar inalambrico zigbee. [en línea] [consultado Octubre de 2012], disponible en internet: <http://www.seccperu.org/files/ZigBee.pdf>

4.2. ARQUITECTURA DEL PROTOCOLO IEEE 802.15.4

El estándar IEEE 802.15.4 se define en una arquitectura la cual está basada en el modelo de referencia para la Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI, Open Systems Interconnection) [3]. Dicha arquitectura abarca la capa física (PHY), que contiene el transmisor-receptor de radiofrecuencia (RF) y una subcapa de control de acceso al medio (MAC) la cual proporciona el acceso al canal físico para todas las transferencias. La Figura 5 muestra la arquitectura del IEEE 802.15.4.

Figura 5 Arquitectura IEEE 802.15.4



4.2.1. Subcapa de control de enlace lógico IEEE 802.2 (LLC, LOGICAL LINK CONTROL). La LLC puede tener acceso a la MAC a través de la subcapa de convergencia de servicio específico (SSCS, *Service Specific Convergence Sublayer*). Esta subcapa proporciona una interfaz entre una instancia de la subcapa LLC del IEEE 802.2 y la subcapa MAC del IEEE 802.15.4. Por otra parte, la capa física del IEEE 802.15.4 puede operar en bandas de frecuencia y velocidades de transmisión de datos de 2450 MHz a 250 kb/seg, 915 MHz a 40 kb/seg y 868 MHz a 20 kb/seg con 16 canales en la banda de 2450 MHz, 10 canales en la banda de 915 MHz y 1 canal en la banda de 868 MHz.¹²

¹² Ibid disponible en internet: <http://www.seccperu.org/files/ZigBee.pdf>

4.2.2. Subcapa MAC. Las características del MAC IEEE 802.15.4 son; la asociación y la disociación, reconocimientos de entrega de trama, mecanismos de acceso al canal, validación de trama, garantía del manejo de las ranuras de tiempo, y manejo de guías. Las sub capas MAC proporcionan dos tipos de servicios hacia capas superiores que se acceden a través de dos puntos de acceso a servicios (SAPs). Los servicios de datos MAC se acceden por medio de la parte común de la sub capa (MCPS-SAP), y el manejo de servicios MAC se accede por medio de la capa MAC de manejo de identidades (MLME-SAP). Esos dos servicios proporcionan una interface entre las sub capas de convergencia de servicios específicos (SSCS) u otro LLC y las capas físicas.

El administrador de servicios MAC tiene 26 primitivas. Comparadas con el 802.15.1 (bluetooth), que tiene alrededor de 131 primitivas en 32 eventos, el MAC 802.15.4 es muy simple, haciéndolo muy versátil para las aplicaciones hacia las que fue orientado, aunque se paga el costo de tener un instrumento con características menores a las del 802.15.1 (por ejemplo el 802.15.4 no soporta enlaces sincronizados de voz).

Las características del MAC IEEE 802.15.4 son:

- Generar beacons (guías) en el caso de ser un coordinador de red y que el resto de nodos se sincronicen al ritmo de los beacons.
- Mecanismo de acceso al medio CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), es decir evita interferencias en las comunicaciones ya que los dispositivos escuchan antes de transmitir
- Validación de tramas.
- Asociación o disociación a una PAN.
- Funciones de seguridad (encriptación AES de 128 bits).
- QoS mediante gestión de GTS (*Granted Time Slot*).
- Entrega de tramas de confirmación: *Acknowledgment Frame* (ACK's).

4.2.3. Formato de tramas MAC. El formato general de las tramas MAC se diseñó para ser muy flexible y que se ajustara a las necesidades de las diferentes aplicaciones con diversas topologías de red al mismo tiempo que se mantenía un protocolo simple.

El estándar IEEE 802.15.4 tiene cuatro diferentes tipos de tramas. Estas son:

- Tramas de datos (*Data Frame*)
- Tramas de confirmación (*Acknowledgment Frame*)
- Tramas de comandos MAC (MAC Command Frame)
- Tramas de Beacon “Guía” (*Beacon Frame*),

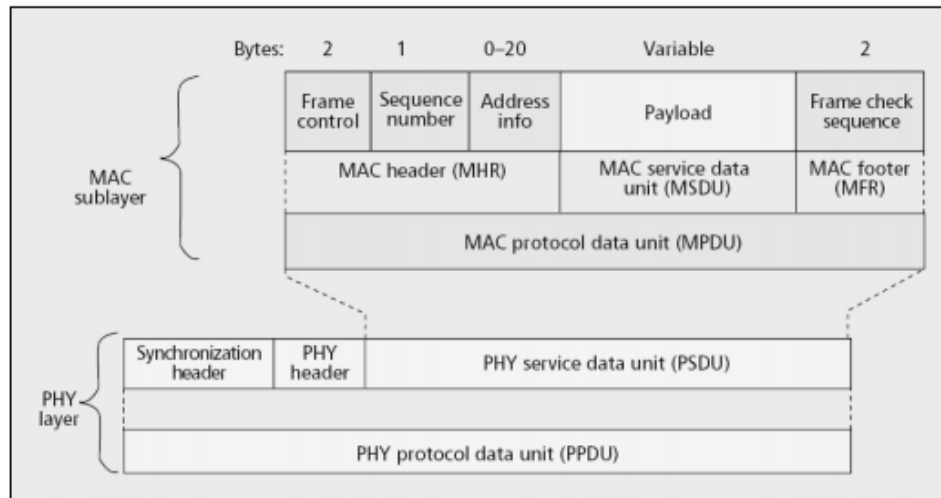
Solo las tramas de datos y tramas *beacon* contienen información proveniente de capas superiores; las tramas de mensajes de confirmación y la de comandos MAC son originadas en la MAC y son usadas por la MAC para comunicaciones igual a igual.

El formato general de una trama MAC se muestra en la figura 6. A la trama del MAC se le denomina unidad de datos de protocolos MAC (MPDU) y se compone del encabezado MAC (MHR), unidad de servicio de datos MAC (MSDU), pie de MAC (MFR). El primer campo del encabezado de trama es el campo de control. Este indica el tipo de trama MAC que se pretende transmitir, especifica el formato y la dirección de campo y controla los mensajes de reconocimiento [10]. En pocas palabras, la trama de control especifica como es el resto de la trama de datos y que es lo que contiene.

El tamaño de las direcciones puede variar entre 0 y 20 bytes. Por ejemplo, una trama de datos puede contener información de la fuente y del destinatario, mientras que la trama de reconocimiento no contiene ninguna información de ninguna dirección. Por otro lado una trama de guía solo tiene información de la dirección de la fuente. Esta flexibilidad en la estructura ayuda a incrementar la eficiencia del protocolo al mantener los paquetes lo más reducido que se puede.

El campo llamado *payload* es variable en longitud; sin embargo, la trama completa de MAC no debe de exceder los 127 bytes de información. Los datos que lleva el *payload* dependen del tipo de trama. El estándar IEEE 802.15.4 tiene cuatro diferentes tipos de tramas. Esas son la trama de guía, de datos, tramas de enterados y tramas de comandos MAC. Solo las tramas de datos y de guía contienen información proveniente de capas superiores; las tramas de mensajes de reconocimiento y la de comandos MAC originados en el MAC son usadas para comunicaciones MAC peer-to-peer.

Figura 6 Forma general de las tramas MAC [10]



Otros campos en la trama MAC son una secuencia de números al igual que tramas de chequeo (FCS). La secuencia de números en los encabezados enlaza a las tramas de acknowledgment con transmisiones anteriores. La transmisión se considera exitosa solo cuando la trama de enterado contiene la misma secuencia de números que la secuencia anterior transmitida. Las FCS ayudan a verificar la integridad de las tramas del MAC.

4.2.4. Otras características MAC. Dependiendo de la configuración de red, una WPAN de baja velocidad (LRWPAN) puede utilizar uno de los dos mecanismos de acceso a canales. En una red de guía con *superframes*, una portadora fragmentada en varios intervalos de tiempo permite múltiples accesos con un mecanismo que evita las colisiones de información (CSMA/CA). En redes sin *beacons* o señales de guía, se utiliza el estándar CSMA-CA. Estas redes trabajan de la siguiente forma. Cuando algún nodo desea transmitir en una red que no permite señales de guía, la red primero revisa si otro nodo se encuentra transmitiendo sobre el mismo canal. Si es el caso, el intento de acceso al canal se tiene que hacer en ocasiones posteriores, o indica una falla de conexión después de varios intentos fallidos.

La trama de *acknowledgment* confirma si una transmisión previa no utiliza los mecanismos de CSMA dado que estos se mandan inmediatamente después de cada paquete de información.

En una red beacon-enabled, cualquier dispositivo que desee transmitir durante el periodo de acceso de contención, espera a que empiece la siguiente ranura de tiempo y después determina si algún otro dispositivo se encuentra transmitiendo en la misma ranura de tiempo. Si algún otro dispositivo se encuentra transmitiendo en dicho *slot*, el dispositivo se repliega a un número aleatorio de slots o indica un fallo en la conexión después de varios intentos.

Además en una red *beacon-enabled*, las tramas de *acknowledgment* no utilizan CSMA.

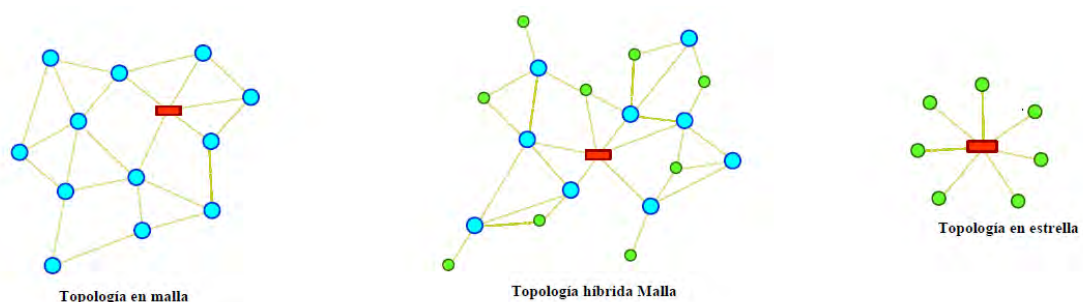
Una función importante del MAC es la confirmación de recepciones exitosas de tramas de algún dispositivo. Las recepciones exitosas y las validaciones de datos o comandos MAC se confirman por medio de *acknowledgment*. Si el dispositivo de recepción no es capaz de recibir la información en ese momento por algún motivo, el receptor no manda ningún *acknowledgment*. El campo de control en la trama indica si se espera un *acknowledgment* o no. La trama que contiene el *acknowledgment* se envía de regreso inmediatamente después de que se hace una validación exitosa de la trama de entrada. Las tramas de guía (beacon frames) mandadas por el coordinador de la PAN y las tramas de *acknowledgments* nunca son respondidas con algún *acknowledgment*.

El estándar IEEE 802.15.4 proporciona tres niveles de seguridad: sin seguridad (por ejemplo, aplicaciones de publicidad); control de acceso a listas (sin seguridad criptográfica); y seguridad con clave simétrica. Para minimizar costos para dispositivos que no lo requieran, el método de distribución de clave no se especifica en el estándar pero se debe de incluir en capas superiores de las aplicaciones apropiadas.¹³

4.3. TOPOLOGÍAS DE UNA RED ZIGBEE

La topología de red hace referencia a la forma como están conectados y la forma de cómo se comunican los diferentes dispositivos que conforman una red. Entre las topologías de red de sensores inalámbricos encontramos las siguientes, figura 7.

Figura 7 Topologías de red



¹³ EL ESTANDAR IEEE 802.15.4. (s.f.). [en línea] [consultado Octubre de 2012], disponible en internet: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/archundia_p_fm/capitulo4.pdf

- Topología en estrella

La comunicación se establece únicamente entre los dispositivos y el coordinador de la red. Si el coordinador de red presenta fallas la red entera sale de funcionamiento, es decir tiene un único punto de fallo.

- Topología en malla

Existe un coordinador de red. Pero a diferencia de la topología en estrella cualquier dispositivo puede comunicarse con cualquier otro siempre y cuando este dentro del rango de cobertura. Proporciona mayor confiabilidad gracias al enrutamiento multitrayecto.

- Topología en árbol

Red de pares donde los FFDs se interconectan entre si utilizado al coordinador de red. Los RFDs se conectan a la red como fin de las ramas y cualquiera de los FFD puede proporcionar servicios de coordinador y brindar sincronización a los otros FFD coordinadores.

4.4.DISEÑO DE LA RED DE SENSORES PARA MONITOREO AMBIENTAL

El proyecto contempla el diseño de una red de sensores para medidas de interés medioambiental en el Jardín Botánico de Cali, el cual es una organización privada sin ánimo de lucro con el objetivo promover la conservación de la fauna y flora de Cali y del Valle del Cauca mediante programas de investigación ambiental.

Básicamente el despliegue de la red de sensores en zonas específicas del jardín botánico, se realiza con el propósito de monitorear las variables ambientales más importantes que intervienen en la formación de incendios, como lo son la temperatura y la humedad de la zona observada, con el fin establecer un análisis geoestadístico del comportamiento de estas variables en dichas zonas durante periodos del año donde las temperaturas se elevan a niveles críticos y desencadenan catástrofes naturales como los incendios, que generan impactos negativos al medioambiente. Estos impactos son por ejemplo, los daños causados por el fuego a los suelos donde las altas temperaturas generadas en el interior de los incendios pueden llegar a eliminar los organismos encargados de desintegrar los materiales orgánicos, como hongos, protozoos y bacterias, comprometiendo su fertilidad y la recolonización posterior por especies vegetales generando de esta forma infertilidad en el suelo para la siembra y cultivo.

La desaparición de la cubierta vegetal impide que el agua de escorrentía se retenga y se infiltre en el terreno, alterando la alimentación de los acuíferos. El suelo queda expuesto a la erosión del viento y la lluvia, y el agua de escorrentía puede llegar a generar fenómenos de inundación.

También se debe tener en cuenta que los incendios dan lugar a contaminación de diversas formas, siendo la más destacada y evidente la emisión a la atmósfera de gran cantidad de gases de efecto invernadero, como el **CO₂**, y partículas en suspensión como consecuencia de la combustión de las masas forestales. Los productos resultantes de la combustión pueden también ser transportados y acabar contaminando las corrientes de agua.¹⁴

4.4.1. Diseño de la red. El primer paso para lograr el diseño de la red de sensores es definir el lugar donde se instalara esta, conociendo las dimensiones que cubre la zona de estudio y localizar las áreas en las cuales halla más periodicidad de incendio para el montaje de dicha red. En este apartado se presentará en forma detallada, el diseño de la red de monitorización de variables medioambientales (temperatura - humedad) para la prevención de incendios en el Jardín Botánico de Cali como caso de estudio para las investigaciones del grupo de investigación en estudios ambientales para desarrollo sostenible GEADES de la Universidad Autónoma de Occidente.

Como primera punto definimos la zona de monitoreo, con sus respectivas dimensiones, lo que da una idea del despliegue que debe tener la red de sensores para cubrir toda esta área y permitir la comunicación entre dispositivos (nodos) a una distancia determinada, de tal forma que la red tenga una funcionalidad confiable en la comunicación entre estos hasta la obtención de los datos en la estación base para su posterior análisis.

La figura 8 muestra el área a monitorear con más periodicidad de incendios en el jardín botánico:

¹⁴ CALI, J. B. (s.f.). *JARDIN BOTANICO DE CALI*. .). [en línea] [consultado Diciembre de 2012], disponible en internet: <http://www.jardinbotanicocali.org/eljardin.html>

Figura 8 Área de estudio – jardín botánico



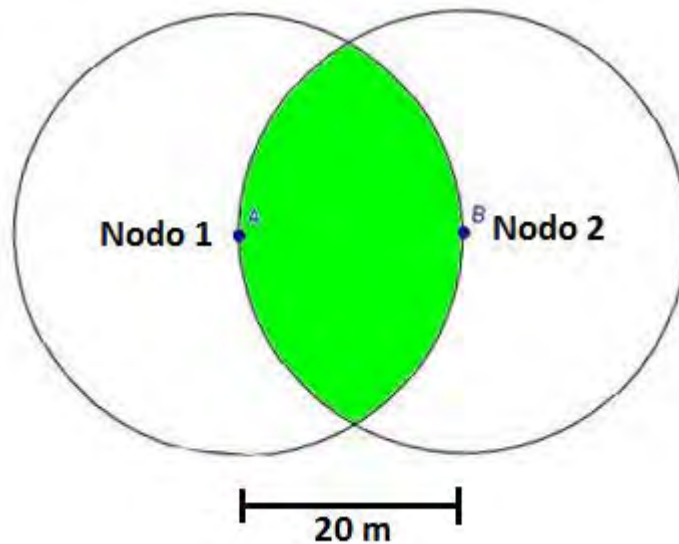
Como se observa en la figura 8 el área que cubre la zona de monitoreo es de 12286.245 m^2 la cual se obtuvo por medio de la herramienta software *google earth*, en la que se delimitó el área, gracias a las coordenadas tomadas en ella en una visita de campo al lugar.

La zona de estimación representa la extensión de área en la cual se determinaran las variables a partir de los datos obtenidos en la zona de monitoreo, y esto por medio del algoritmo de estimación geoestadístico implementado en este proyecto, el cual se presentara en detalle en el capítulo 5.

Basados en el criterio de comunicación entre nodos, se procedió a realizar una serie de pruebas en el campus de la universidad para estimar la máxima distancia a la cual los nodos se pueden comunicar con obstáculos (arbustos, árboles, césped, etc.), dado que el terreno a monitorear es una zona montañosa, estos entornos afectan mucho a la señal debido a la gran cantidad de obstáculos y a su dinamismo, produciendo fenómenos como la refracción, reflexión y dispersión, que a su vez causan la propagación multicamino. Dicha propagación es la causante de los desvanecimientos de la señal. Generalmente, los modelos de propagación utilizados en interiores y exteriores son experimentales, basados en la predicción de las variaciones de distribución espacial de la potencia en función de la distancia, por lo que fue necesario determinar la dicha distancia en función de la comunicación entre nodos y lo que se obtuvo al realizar las pruebas a diferentes distancias fue $20\text{m} \pm 5\text{m}$. La

figura 9 muestra la distancia entre nodos y sus radios de cobertura con obstáculos.

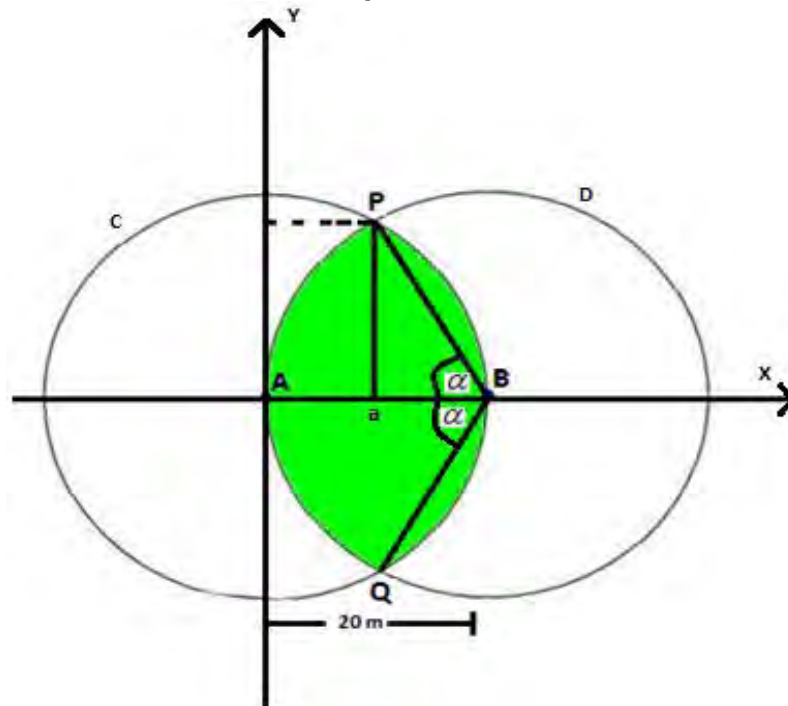
Figura 9 Distancia entre nodos con obstáculos



Para calcular o estimar el número de nodos necesarios para cubrir la zona de estudio, se calculó el área máxima que cubre un nodo con obstáculos para establecer comunicación con otro nodo. El área se muestra en el área sombreada en verde en la figura 9.

Para determinar esta área de comunicación entre nodos se obtienen las ecuaciones para cada circunferencia ubicando los nodos en un plano de coordenadas, estando el nodo 1 en el origen del plano y el nodo 2 veinte metros en el eje x respecto al nodo 1, de la forma en que se muestra en la figura 10.

Figura 10 Ubicación de nodos en plano de coordenadas



Para el análisis geométrico del área de intersección entre circunferencias se definen las coordenadas cartesianas de los puntos de ubicación de los nodos en la figura 10.

$$A(0,0)$$

$$B(20,0)$$

$$r = 20$$

Para describir las ecuaciones de las circunferencias, nos basamos en la ecuación general de la circunferencia (1) :

$$(x-h)^2 + (y-k)^2 = r^2 \quad (1)$$

Siendo (h,k) el centro de la circunferencia y r el radio

Reemplazando las coordenadas y el radio en la ecuación (1) se obtiene las ecuaciones:

Ecuación para circunferencia C :

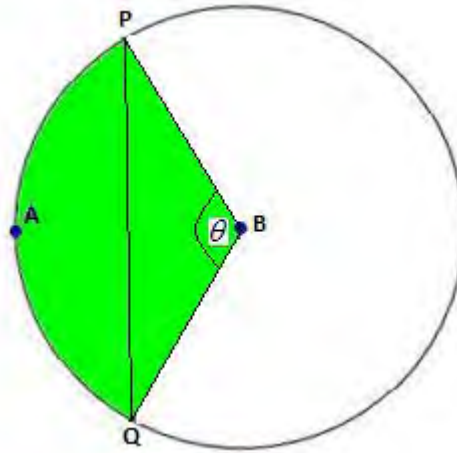
$$x^2 + y^2 = 400 \quad (2)$$

Ecuación para circunferencia D :

$$(x-20)^2 + y^2 = 400 \quad (3)$$

De esta forma se procede a determinar las coordenadas de los puntos P y Q , para hallar los ángulos α , que permitirán el cálculo del sector circular \overline{APBQ} , como se muestra en la figura 11.

Figura 11 Sector circular



Para determinar dichas coordenadas de P y Q , se procede a igualar las ecuaciones (2) y (3), ya que en dichos puntos las dos circunferencias se intersectan, por lo tanto las ecuaciones se obtiene:

$$\begin{aligned}x^2 + y^2 &= (x - 20)^2 + y^2 \\x^2 + y^2 &= x^2 - 40x + 400 + y^2 \\-40x + 400 &= 0 \\400 &= 40x \\x &= 10\end{aligned}$$

Ahora reemplazando $x = 10$ en (2) para obtener la componente y , se obtiene que:

$$\begin{aligned}(10)^2 + y^2 &= 400 \\y^2 &= 400 - 100 \\y &= \sqrt{300}\end{aligned}$$

Por lo tanto las coordenadas son: $P(10, \sqrt{300})$ $Q(10, -\sqrt{300})$

De esta forma se calcula el ángulo α , ubicándolo en el triángulo rectángulo \overline{aPBa} , donde se puede aplicar las relaciones trigonométricas, así:

$$\begin{aligned}\tan \alpha &= \frac{\overline{aP}}{\overline{aB}} \\ \tan \alpha &= \frac{\sqrt{300}}{10} \\ \alpha &= \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{300}}{10}\right) \\ \alpha &= 60^0\end{aligned}$$

De esta forma se puede determinar el ángulo θ , para determinar el área del sector circular de la figura 11, de esta forma

$$\begin{aligned}\theta &= 2\alpha \\ \theta &= 2(60^0) = 120^0\end{aligned}$$

Ahora aplicando la relación para el área de un sector circular A_{sc} se obtiene:

$$A_{sc} = \frac{\pi r^2 \theta}{360^0} = \frac{(20m)^2 (120^0) \pi}{360^0} = 418.87m^2$$

Seguidamente procedemos a hallar el área A_t del triángulo \overline{PBQP} así:

$$A_t = \frac{\overline{PQ} * 10}{2} = \frac{(2\sqrt{300}) * 10}{2} = 173.20m^2$$

Ya teniendo el área del sector circular A_{sc} y el área del triángulo A_t obtenemos el área A_{sg} del segmento circular \overline{APQA}

$$\begin{aligned}A_{sg} &= A_{sc} - A_t \\ A_{sg} &= 418.87m^2 - 173.20m^2 \\ A_{sg} &= 245.67m^2\end{aligned}$$

Por lo que de esta forma se obtiene el área de la intercesión A_I de las dos circunferencias sombreadas en verde, que determinan el área de alcance máximo con obstáculos por nodo de la figura 10 así:

$$\begin{aligned}A_I &= 2A_{sg} \\ A_I &= 2(245.67m^2) \\ A_I &= 491.34m^2\end{aligned}$$

Para el cálculo del número de nodos necesarios para cubrir la zona de monitoreo, se tiene en cuenta que $491.34m^2$ es un área formada por dos nodos, por lo que esta área se plantea así:

$$491.34m^2 / 2nodos$$

Con esta área se estima el número de nodos aproximado para cubrir el área de monitoreo:

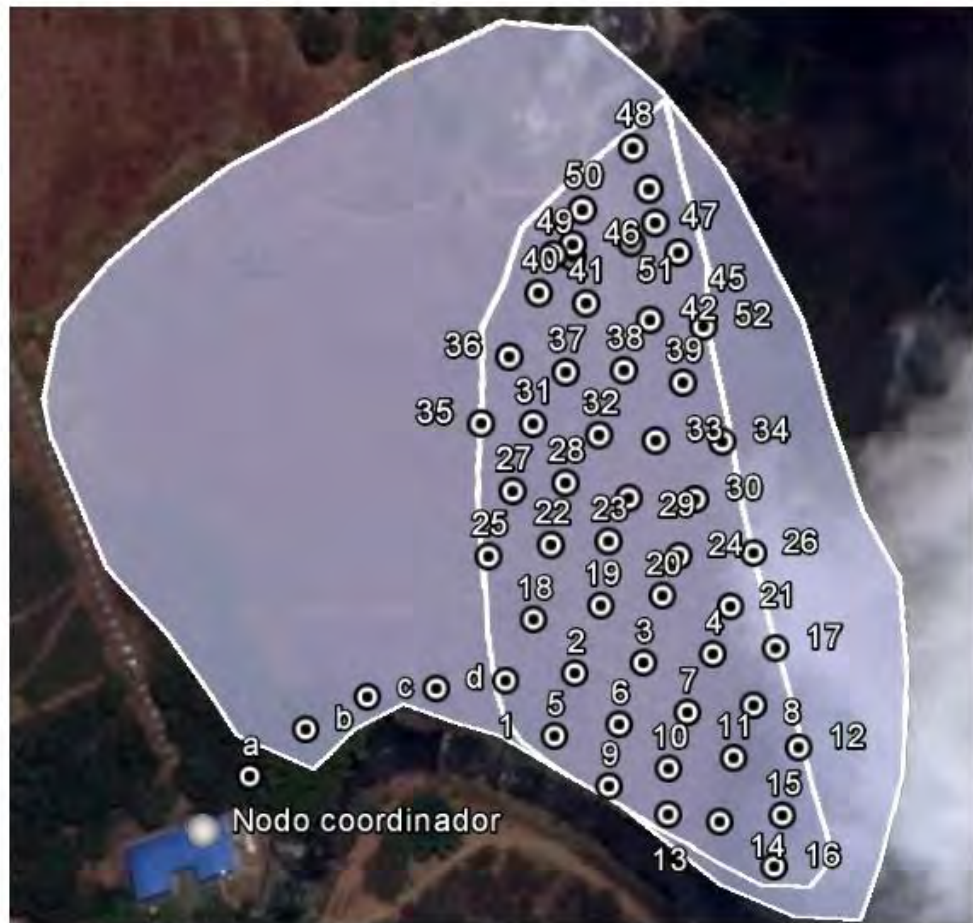
$$\# Nodos = \frac{Area_{\text{monitoreo}}}{A_i} = \frac{12286.245m^2}{491.34m^2 / 2nodos} = 50nodos$$

Por lo tanto para el área de monitoreo se tiene un estimado de 50 nodos como mínimo para realizar el despliegue de la red y realizar el estudio correspondiente de las variables en la zona.

Para la instalación de la red en la zona de estudio se utilizó la topología de red malla, ya que esta permite que varios nodos tengan más de dos conexiones, y que si, en un momento dado, un nodo del camino falla y se cae el enlace, pueda seguir la comunicación entre todos los demás nodos debido a que posee enlaces alternos, permitiendo de esta forma que la transmisión de los datos pueda llegar a su destino.

Por medio de la herramienta *google earth* se establecieron los puntos de ubicación de cada nodo en el área estudio, partiendo desde el coordinador de la red y considerando la distancia entre nodos de 20 m, se fueron ubicando los demás nodos a través de toda la zona, hasta cubrirla en su totalidad. Cabe resaltar que el número total de nodos que se necesitaron para cubrir el área fueron 50, ya que esta no es una zona plana por lo que muchos de los puntos de ubicación se encuentran en zonas donde es necesario bordear la montaña para alcanzar la comunicación entre dos puntos, ver figura 12.

Figura 12 Despliegue de la red en zona de monitoreo



Gracias a que la versión del Zigbee implementado en el diseño de la red es el Zigbee pro (0x02) o Zigbee V.2, se permite la creación de redes a grande escala sin presentar limitaciones en máxima profundidad en saltos de la información y máxima cantidad de hijos por nodo, por lo que la cantidad de nodos determinados (25 nodos) para el diseño de la red es óptima para el funcionamiento.^{15 16}

¹⁵ALLIANCE, Z. (2008). ZigBee-PRO Stack Profile: Platform. SAN RAMON CALIFORNIA.

¹⁶ INSTRUMENT, T. (s.f.). TI E2E COMMUNITY.).[en línea] [consultado Diciembre de 2012], disponible en internet: http://e2e.ti.com/support/low_power_rf/f/158/t/94755.aspx

4.4.2. Inicio de la red Zigbee. Este procedimiento sólo puede ser iniciado por dispositivos Coordinadores, que no se encuentren ya dentro de una red ZigBee. Es decir, un coordinador, sólo puede aparecer en una red. Pero en el caso de que cualquier otro tipo de dispositivo o de que un Coordinador asociado ya a una red, iniciase este procedimiento sería denegado por la capa de Red.

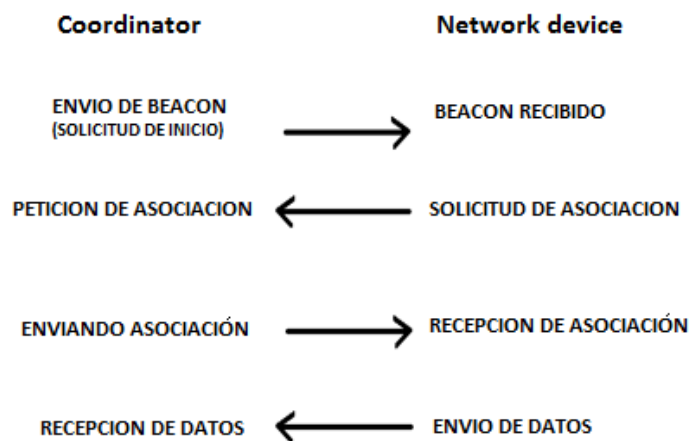
A continuación se explicara brevemente las funciones que deben desempeñar los dispositivos para la inicialización de la red y para garantizar un óptimo desempeño.

- Nodos coordinadores
- Los dispositivos FFD generan un *MLME-RESET* y *MLME-SACN* a la capa MAC para resetear la MAC y generar una búsqueda de dispositivos o de una PAN.
- La MAC presenta un resultado y se asigna el identificador PAN y la dirección corta. Después de asignar estos valores, aunque ya establecidos por la aplicación, se genera *MLME-START* y se estabiliza la nueva PAN. También, debe activarse la transmisión en la capa física al enviar desde la *MAC PLME-SET-TRX-STATE*.
- Se configura los datos de la supertrama y se empieza transmitir las tramas BEACON.
- Luego el coordinador está a la espera de peticiones de asociación de los diferentes nodos por medio del *MLME-ASSOCIATE* y se envía la respuesta de asociación. Dentro de este proceso se generaran los *slot de tiempo garantizado* (GTS) y por ende la configuración de la supertrama (en caso de que se realice esta configuración).
- Nodos sensores:
 - ❖ Los dispositivos RFD generan un *MLME-RESET* y *MLME-SACN* a la capa MAC para resetear la MAC y generar una búsqueda una red PAN.
 - ❖ Al encontrar una red PAN, después de escuchar el primer beacon el dispositivo enviará una petición de asociación y queda a la espera de la respuesta de su coordinador.
 - ❖ Al ser aceptado el dispositivo procederá a tomar los datos de humedad y temperatura de acuerdo con el tiempo de muestreo asignado en la aplicación.

- ❖ Si el dispositivo tiene listo los datos de humedad y temperatura al escuchar un beacon enviara estos datos a su coordinador, si no se recibe un ACK por parte del coordinador, el nodo sensor retransmitirá los datos de humedad y temperatura hasta 3 veces, pasados tres intentos el nodo dará el dato por perdido.
- ❖ Si el sale del área de cobertura de su red, volverá al iniciar el proceso, esto pasara cuando no es retornado un ACK.¹⁷

El siguiente esquema, figura 13, muestra los pasos que tanto Coordinador como Dispositivo final deben seguir para realizar la asociación a la red y la posterior transmisión de los datos.

Figura 13 Esquema de Envío de Beacon, Asociación y Envío de Datos.



En este esquema se puede observar que el dispositivo coordinador inicia la red con el envío de beacon, de tal forma que el dispositivo de red (router, dispositivo final) escucha la trama del beacon e inmediatamente envía la solicitud de asociación, seguido de esto el coordinador responde a dicha solicitud. Cuando el dispositivo de red ha sido asociado a la red este se prepara para empezar a tomar datos de temperatura y humedad de acuerdo con el tiempo de muestreo que le ha sido asignado. Cuando las muestras están listas y llega una trama de beacon el dispositivo final envía los datos. Cuando el coordinador recibe los datos de su hijo este le responde con un ACK. Si la trama de reconocimiento llega al dispositivo final el envío de datos se da como exitoso, y en caso contrario los dispositivos finales han sido programados para que retransmitan hasta 3 veces durante el CAP, en caso de no tener respuesta el dato se dará por perdido y se iniciara nuevamente el proceso de tomar la muestras y luego enviarlas.

Para comprobar el correcto funcionamiento de la red en su inicialización y establecimiento para la comunicación de los datos, en la figura 14 se puede ver

¹⁷ PEÑA PARRA, M. (2011). Diseño e implementación de una red de sensores inalámbrica para el monitoreo de temperatura y humedad durante el cultivo del champiñón. cali-colombia: universidad autónoma de occidente

una captura de tramas realizada con el dispositivo CC2531 USB *Dongle* y el *software Packet Sniffer* sintonizado en el mismo canal que los nodos.

Estas tramas muestran el momento en el que el coordinador de red comienza a transmitir beacons, el proceso de asociación del dispositivo final, la transmisión de mensajes de coordinador a dispositivo final, y la transmisión de mensajes de dispositivo final a coordinador.

4.5. CAPTURA DE TRAMAS EN RED

En la inicialización de la red se emiten mensajes de difusión como beacons o señales de escaneo por parte del dispositivo para determinar si ya existe un coordinador en la red, en caso de no ser así este se establece como coordinador e inicia la red, ya que ha sido previamente configurado. En la Figura 14 se observa el quinto campo que indica que es un mensaje de broadcast y el sexto que indica las balizas transmitidas por el dispositivo. Por último, el dispositivo vuelve a escuchar el canal a la busca de una baliza de respuesta.

Figura 14 Baliza emitida por el nodo para determinar si ya existe un coordinador

P.nbr.	Time (ms)	Frame control field					Dest. PAN	Dest. Address		RSSI (dBm)
RX	+0	Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr				
1	=0	CMD	0	0	0	0	0xFFFF	0xFFFF	Beacon request	-45

El inicio de un router es similar al del coordinador. La principal diferencia es que ahora el dispositivo recibirá respuesta por parte de la red, por lo que entenderá que no debe configurarse como coordinador. En lugar de ello simplemente se asociará al coordinador de red ya existente (o a un router si éste tiene el permiso de asociación desactivado) y comenzará su funcionamiento normal, enviando datos cada cierto periodo de tiempo, ver Figura 15

Figura 15. Baliza enviada por el router y respuesta del coordinador

P.nbr.	Time (ms)	Frame control field					Dest. PAN	Dest. Address	Beacon request	RSSI (dBm)
RX	+0	Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr				
1	=0	CMD	0	0	0	0	0xFFFF	0xFFFF		-45

P.nbr.	Time (ms)	Frame control field					Source PAN	Source Address	Superframe specification	GTS fields	RSSI (dBm)
RX	+3	Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr			BO SO F.CAP BLE Coord Assoc	Len Permit	
2	=3	BCN	0	0	0	0	0x0605	0x0000	15 15 15 0 1 1	0 0	-48

El paquete número 7 (P.nbr. = 7) es una petición de asociación (*Association request*) por parte del router que, como vemos, requiere de confirmación ack a nivel MAC. Este ack es el paquete 8. El paquete 9 sirve para reclamar una respuesta por parte del coordinador. Cuando dicho coordinador recibe la petición calcula una dirección corta para el router (short_addr = 0x0001 --- P.nbr.=10), ver Figura 16.

Figura 16 Asociación router- coordinador

P.nbr.	Time (ms)	Frame control field					Dest. PAN	Dest. Address	Source PAN	Source Address	Association request	RSSI (dBm)
RX	+765	Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr					Assoc.req: 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111	
7	=2690	CMD	0	0	1	0	0x0605	0x0000	0xFFFF	0x00124B00000B0037		-42

P.nbr.	Time (ms)	Frame control field									RSSI (dBm)
RX	+0	Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr					
8	=2691	ACK	0	0	0	0					-51

P.nbr.	Time (ms)	Frame control field					Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	Link request	RSSI (dBm)
RX	+370	Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr					
9	=3061	CMD	0	0	1	1	0x0605	0x0000	0x00124B00000B0037		-41

P.nbr.	Time (ms)	Frame control field					Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	Link req: Assoc. req: Short_addr: Assoc. status: Link req: Successful	RSSI (dBm)
RX	+2	Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr					
10	=3063	CMD	0	0	1	1	0x0605	0x00124B00000B0037	0x00124B00000B8605		-45

P.nbr.	Time (ms)	Frame control field									RSSI (dBm)
RX	+0	Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr					
11	=3064	ACK	0	0	0	0					-41

Una vez asociados, los dispositivos deben vincularse a nivel de aplicación. Esto sirve para comprobar que ambos dispositivos funcionan con la misma aplicación (mismo perfil de aplicación), y que sus puntos de acceso son compatibles.

El dispositivo se ha configurado correctamente como router y comienza su funcionamiento regular, ver Figura 17.

Figura 17 Vinculación del router al coordinador

P.nbr.	Time (ms)	Frame control field	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	APS Frame control field	APS Dest Endpoint	APS Cluster Id	APS Profile Id	APS Src Endpoint	APS Payload	RSSI (dBm)
RX	+21	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr				Type Del.mode Ind.am Sec Ack						
12	=3096	DATA 0 0 0 1	0x0605	0xFFFF	0x0001	Data Broadcast 0 0 0	0x00	0x0006	0x0000	0x00	01 FF FF 10 0F	-42
P.nbr.	Time (ms)	Frame control field	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	APS Frame control field	APS Dest Endpoint	APS Cluster Id	APS Profile Id	APS Src Endpoint	APS Payload	RSSI (dBm)
RX	+7	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr				Type Del.mode Ind.am Sec Ack						
13	=3093	DATA 0 0 0 1	0x0605	0xFFFF	0x0000	Data Broadcast 0 0 0	0x00	0x0006	0x0000	0x00	01 FF FF 10 0F	-44
P.nbr.	Time (ms)	Frame control field	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	APS Frame control field	APS Dest Endpoint	APS Cluster Id	APS Profile Id	APS Src Endpoint	APS Payload	RSSI (dBm)
RX	+6	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr				Type Del.mode Ind.am Sec Ack						
14	=3099	DATA 0 0 1 1	0x0605	0x0001	0x0000	Data Unicast 0 0 1	0x00	0x0006	0x0000	0x00	01 00 00	-44
P.nbr.	Time (ms)	Frame control field										RSSI (dBm)
RX	+1	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr										
15	=3100	ACK 0 0 0 0										-42
P.nbr.	Time (ms)	Frame control field	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	APS Frame control field	APS Dest Endpoint	APS Cluster Id	APS Profile Id	APS Src Endpoint		RSSI (dBm)
RX	+5	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr				Type Del.mode Ind.am Sec Ack						
16	=3105	DATA 0 0 1 1	0x0605	0x0000	0x0001	Ack. Unicast 0 0 0	0x00	0x0006	0x0000	0x00		-41
P.nbr.	Time (ms)	Frame control field										RSSI (dBm)
RX	+0	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr										
17	=3106	ACK 0 0 0 0										-44
P.nbr.	Time (ms)	Frame control field	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	APS Frame control field	APS Dest Endpoint	APS Cluster Id	APS Profile Id	APS Src Endpoint	APS Payload	RSSI (dBm)
RX	+8	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr				Type Del.mode Ind.am Sec Ack						
18	=3115	DATA 0 0 1 1	0x0605	0x0000	0x0001	Data Unicast 0 0 0	0x00	0x0001	0x0000	0x00	02 00 00	-41
P.nbr.	Time (ms)	Frame control field										RSSI (dBm)
RX	+1	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr										
19	=3116	ACK 0 0 0 0										-45
P.nbr.	Time (ms)	Frame control field	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	APS Frame control field	APS Dest Endpoint	APS Cluster Id	APS Profile Id	APS Src Endpoint	APS Payload	RSSI (dBm)
RX	+7	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr				Type Del.mode Ind.am Sec Ack						
20	=3124	DATA 0 0 1 1	0x0605	0x0001	0x0000	Data Unicast 0 0 1	0x00	0x0001	0x0000	0x00	02 00 05 06 0B 00	-44
P.nbr.	Time (ms)	Frame control field										RSSI (dBm)
RX	+1	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr										
21	=3125	ACK 0 0 0 0										-42

De igual forma se realiza la asociación de un dispositivo final a la red mediante una solicitud al coordinador a través el router (dispositivo retransmisor) y se asigna la dirección 0x796F al dispositivo final.

La trama de datos enviada por el dispositivo final al coordinador es:

Figura 18 Paquete de datos enviado por un dispositivo final y confirmación ack a nivel MAC

P.nbr.	Frame control field					Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	APS Frame control field				APS Dest. Endpoint	APS Cluster Id	APS Profile Id	APS Src Endpoint	APS Payload	RSSI (dBm)	
RX	Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr				Type	Del.mode	Ind.am	Sec	Ack						
1	DATA	0	0	1	1	0x2A99	0x0000	0x796F	Data Unicast	0	0	0	0	0x02	0x0001	0x0F10	0x01	1E	-63

P.nbr.	Time (ms)	Frame control field					RSSI (dBm)
RX	+1	Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr	
2	=1	ACK	0	0	0	0	-62

Luego del envío de los datos por parte de los dispositivos configurados como sensores al coordinador, el dispositivo permanece a la escucha para recibir confirmación *ack* del nodo contiguo, ver Figura 18. De esta forma estos nodos entran en modo de bajo consumo durante un tiempo determinado (periodo de muestreo) hasta el siguiente envío de datos.

4.6. IMPLEMENTACIÓN DE ACCIÓN DE CONTROL EN LA RED DE SENSORES

Para la contribución al desarrollo de la red de sensores, se procedió a acondicionar un sistema para el control de las variables medioambientales a sensar basado en el sistema ON/OFF, el cual ejecuta la señal de acción dependiendo de las mediciones recibidas por parte de los sensores, con valores que se encuentren por encima de un parámetro establecido para activación de un actuador y de la misma forma la generación de una señal para la desactivación de dicho actuador en mediciones por debajo del parámetro de control.

Este sistema de control se consideró en el desarrollo con el fin de dar una contribución a la problemática de actividades que requieran la ejecución de tareas en tiempo real, como son las acciones sobre los dispositivos asociados a actuadores.

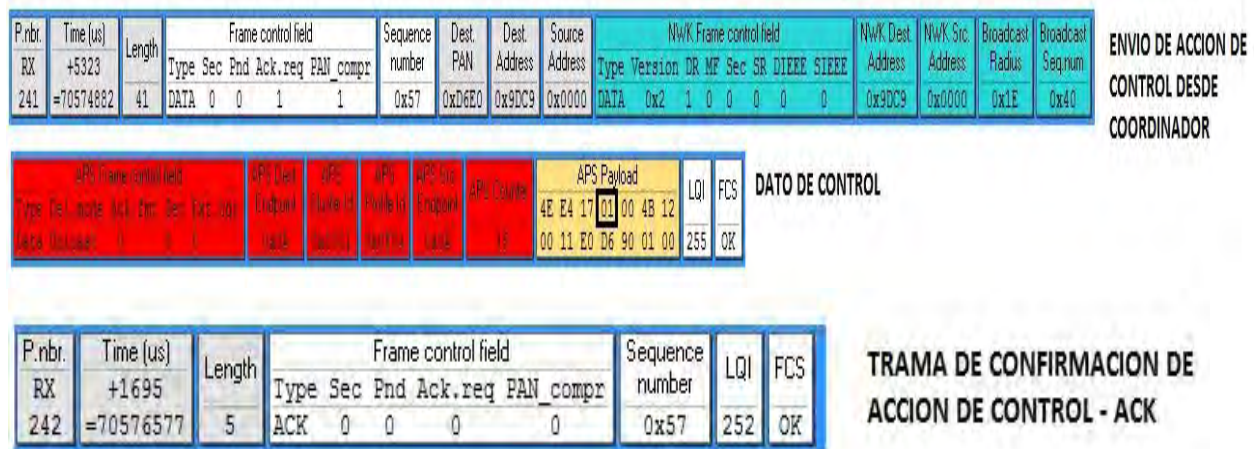
La acción de control de dos posiciones, o encendido – apagado (ON/OFF). En un sistema de dos posiciones, en el que el actuador tiene solo dos posiciones fijas, que en este caso de la red de sensores es simplemente actuador encendido o apagado, el controlador es relativamente simple, y por esta razón es usado ampliamente en sistemas de control, como lo es el sistema de control de temperatura simulado en este proyecto para el control del regado de cultivos en agricultura y la prevención de incendios en el ámbito medioambiental.

Para el contexto de este proyecto el sistema de actuación se ha desarrollado e implementado en el dispositivo coordinador de la red, el cual procesa las mediciones de las variables que recibe de los diferentes nodos que conforman la red, donde este procesamiento está basado en el sistema de control, el cual analiza dichas mediciones de temperatura recibidas respecto a un valor predefinido por el agricultor o analista ambiental, de tal forma que para valores de temperatura mayores a dicho parámetro se ejecuta la acción de control y se envía desde el coordinador la señal de actuación a la dirección del nodo del cual se recibió la temperatura mayor al parámetro de comparación, para el encendido del actuador ubicado en dicho nodo, y de la misma forma cuando de esta dirección de nodo se reciban temperaturas menores al parámetro de comparación se envía la señal de actuación para desactivar el actuador. Los dispositivos actuadores han de ser implementados en nodos que se encuentren en posiciones centrales de la área de monitoreo para poder abarcar un espacio que cubra las zonas de monitoreo de cada nodo, ya que no en todos los nodos se implementara un actuador por razones de costos, y las acciones de control deben buscar la regulación de las variables en la totalidad del área de monitoreo.

Para realizar la simulación del sistema de actuación se procedió a configurar en la programación del coordinador de la red un sistema de control ON/OFF, en el cual un diodo led en un nodo representa el actuador, que en este análisis sería una electroválvula para el regado del terreno, el cual se ejecuta por las acciones enviadas por el controlador implementado en el nodo coordinador, en función de la variación de las variables a controlar, en este caso la temperatura del suelo y humedad relativa.

Este sistema de control de la red actuara basado en parámetros críticos analizados en situaciones ya ocurridas en el entorno ambiental y de agricultura, como lo son las temperaturas que sobrepasan los $40^{\circ}C$ en el verano con mucha frecuencia, las cuales generan incendios en la zonas del jardín botánico y otras, y también la transpiración y evaporación del agua que se da en diferentes cultivos por las altas temperaturas, lo que produce deshidratación en las plantas provocando de esta forma una falta de desarrollo en los mismos. Estos factores dentro del monitoreo de las variables requieren de un estudio previo para evitar consecuencia negativas en estas zonas de estudio, por lo que se ha hecho necesario el análisis de la implementación de acciones de control que mantengan una estabilidad de las temperaturas del suelo para evitar posibles incendios, y en la parte agrícola la preservación de los cultivos en sus diferentes etapas de desarrollo con las cantidades necesarias de agua.

Figura 19 Trama de control y ACK



En la figura 19 se muestra la acción de control que envía el coordinador de la red una vez se halla comparado la temperatura sensada por el nodo dispositivo final con el parámetro de temperatura establecido, que es $32^{\circ}C$, donde dicho coordinador envía un 1 lógico como se muestra en el recuadro negro en la trama de datos (*Dato de control*), que indica el encendido de un led que representa el actuador. El direccionamiento de la trama se puede ver, en los campos de dirección fuente (Source Address) y dirección de destino (Dest Address), que muestran quien envía y quien recibe dicha trama de datos.

4.7. SIMULACIÓN DE LA RED

Para verificar el desempeño y la viabilidad de la red es necesario crear un modelo de la misma en la que se pueda simular las características y parámetros que determinan a una red de sensores inalámbricos en funcionamiento. Básicamente lo que se necesita es poder crear una WSN completamente personalizada, modificar dicha red, generar eventos, resolver el enrutamiento entre sensores, transmitir datos y guardar información en archivos planos para su posterior utilización.

Para llevar a cabo el desarrollo de este modelo de la red es necesaria la utilización de herramientas software que permitan visualizar el funcionamiento de la red bajo los parámetros determinados en este diseño.

La herramienta a utilizar es el *toolbox truetype* desarrollado en MATLAB para simulación de redes de sensores inalámbricos, el cual presenta una serie de características fundamentales para la aplicación en redes ad-hoc con

algoritmos de enrutamiento, los cuales deben ser tolerables a fallos en los nodos y que hagan un uso eficiente de la energía.

Las características que el *software* permite son:

- El sistema debe permitir la creación de un espacio donde se puedan ubicar los sensores y dispositivos en cualquier parte del área y la cantidad que el usuario desee.
- Se debe contar con la opción de poder agregar un nuevo sensor a la red existente.
- Se debe determinar la distancia máxima alcanzada por la señal de un dispositivo para permitir la transmisión de la información entre otros nodos.

La red inalámbrica TRUETIME simula la comunicación en una red ad-hoc, es decir, sin un punto de acceso centralizado o infraestructura existe para coordinar el tráfico a través de la red. En estas redes, es necesario implementar la funcionalidad de descentralizados para que sean capaz de enrutar el tráfico sobre la red. En este ejemplo se describe una implementación en TRUETIME de uno de los protocolos de enrutamiento ad hoc el cual es el AODV implementado en el estándar Zigbee utilizado en este trabajo.

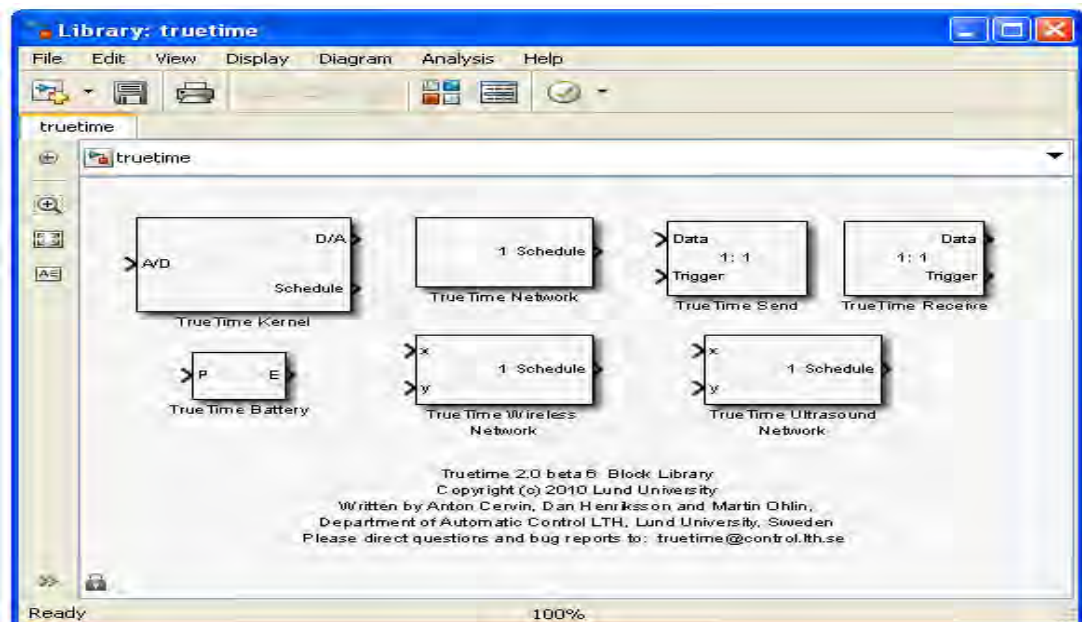
AODV representa un enrutamiento por vector de distancia (Ad hoc On-Demand Distance Vector) y al contrario de otros mecanismos, no se basa en la transmisión periódica de mensajes de enrutamiento entre nodos. En su lugar se crean rutas bajo demanda, es decir, sólo cuando realmente se necesitan para enviar el tráfico entre una fuente y un nodo destino. Esto conduce a una disminución sustancial en la cantidad de ancho de banda consumido para establecer rutas. A continuación sigue una breve descripción de la funcionalidad de AODV. Para una definición completa del protocolo AODV. AODV utiliza tres tipos básicos de mensajes de control a fin de construir e invalidar rutas: solicitud de ruta (RREQ), respuesta de ruta (RREP), y error de ruta de mensajes (RERR). Estos mensajes de control de origen contienen números de secuencia, que se utilizan para asegurar las rutas libres y bucles limpios.

Un nodo que solicita una ruta a un nodo de destino inicia la ruta por descubrimiento, transmitiendo un mensaje RREQ a sus vecinos. Uno de los nodos que recibe el RREQ se inicializa mediante la actualización de su información de encaminamiento hacia la fuente. Si el mismo RREQ no se ha recibido antes, el nodo comprueba su tabla de enrutamiento para una ruta

hacia el destino. Si existe una ruta con un número de secuencia mayor o igual a la contenida en el RREQ, un mensaje de RREP es enviado de vuelta hacia la fuente. De lo contrario, el nodo fuente retransmite el RREQ. Cuando un RREP se ha transmitido de vuelta al nodo de origen, la ruta se establece para el envío de datos. Mensajes periódicos de “HELLO” se utilizan para mantener la conectividad local de la información entre nodos vecinos. Si un nodo detecta un enlace roto, comprueba su tabla de enrutamiento para encontrar todas las rutas que utilizan dicho enlace en el siguiente salto, con el fin de propagar un RERR sobre el enlace, a todos los nodos que se encuentran a un salto anterior en cualquiera de estas rutas.¹⁸

Para la simulación de la red se utilizó un ejemplo de simulación de TRUETIME basado en el algoritmo de enrutamiento AODV, el cual permite la configuración de una serie de parámetros para establecer la red de sensores como una red 802.15.4 (Zigbee). La simulación está basada en el entorno de programación visual simulink de MATLAB, que trabaja con diagramas de bloques, los cuales representan una funcionalidad o elemento de la red Zigbee. TRUETIME provee sus propios bloques para el diseño y simulación de la red, ver figura 20, los cuales son configurados para su inicialización y ejecución en tiempo real, por medio de código fuente escrito en MATLAB o C++ en el entorno de visual studio. Si el código fuente esta en C++ este es compilado a código ejecutable en MATLAB para tener todo desarrollo de simulación en este entorno.

Figura 20 Librería de bloques – TRUETIME 2.0



¹⁸ CERVIN, A., HENRIKSSON, D., & OHLIN, M. (junio 2010). true time 2.0 beta - reference manual. lund university.

Para la simulación de la red se utilizó el bloque de redes inalámbrica (True Time Wireless Network - Figura 20) el cual simula acceso al medio y transmisión de paquetes en una red inalámbrica de área local. Posee entradas x e y para especificar la ubicación real de los nodos. Dos protocolos de red son compatibles en este momento: IEEE 802.11b / g (WLAN) y el IEEE 802.15.4 (ZigBee) para este caso. Los parámetros de configuración se muestran en Figura 21 en la ventana de configuración del bloque. Estos parámetros se establecieron basados en el diseño de red de este proyecto.

Figura 21 Parámetros del bloque –True Time Wireless network

Function Block Parameters: TrueTime Wireless Network

Wireless Network (mask) (link)

Parameters

Network type: 802.15.4 (ZigBee)

Network Number: 1

Number of nodes: 10

Data rate (bits/s): 250000

Minimum frame size (bits): 31

Transmit power (dbm): pow

Receiver signal threshold (dbm): thres

Pathloss function: default

Pathloss exponent (1/distance^x): 3.5

ACK timeout (s): 0.00004

OK Cancel Help Apply

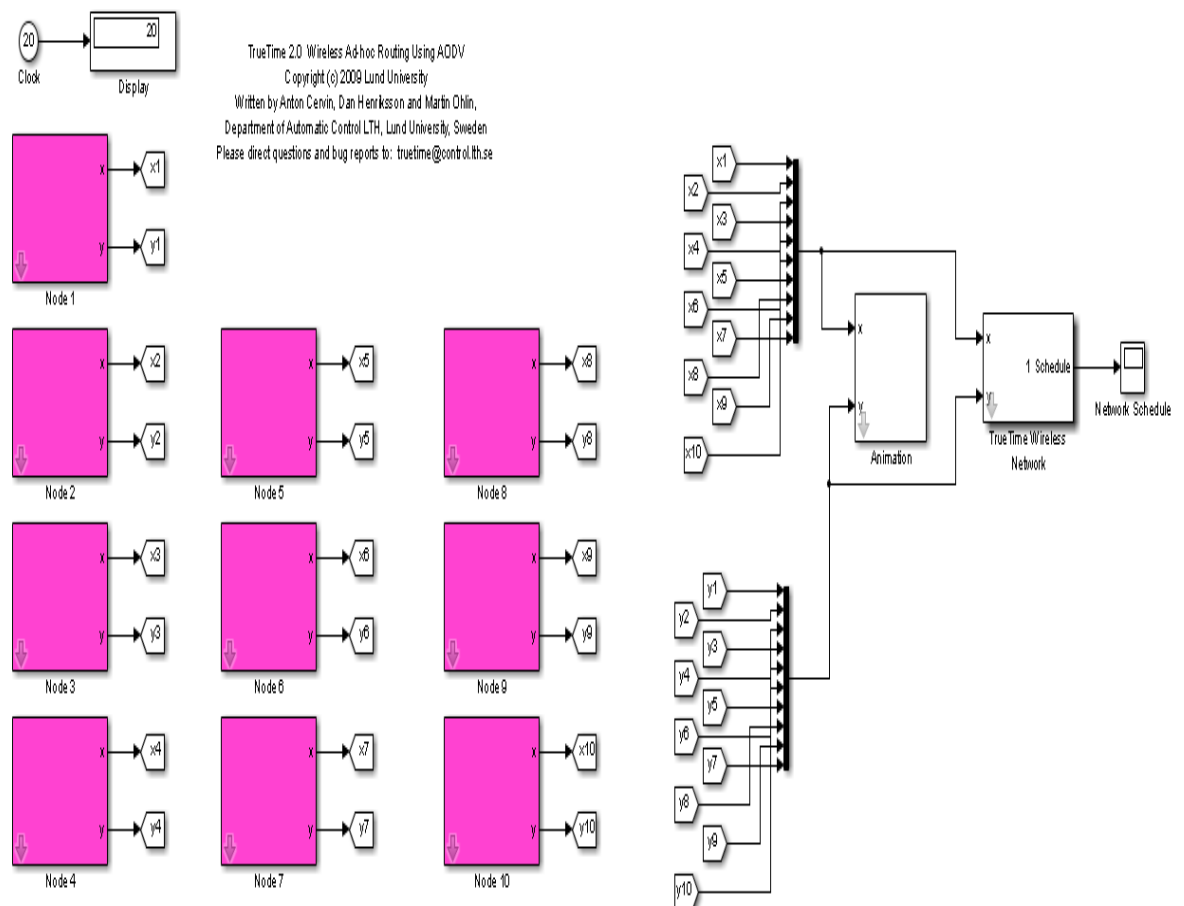
En el ejemplo de simulación AODV se modificaron los parámetros ya mencionados del bloque True Time Wireless network, y se agregaron tres nodos más a los siete ya preestablecidos, para tener un número mayor de nodos que permitiera visualizar un enrutamiento un poco más amplio de los mensajes y de los tiempos en que se transmiten, también se modificaron las variables pow (potencia de transmisión) y thres (Receptor de señal de umbral), ver figura 21, para hallar la distancia máxima a la que se pueden comunicar los nodos, basados en la distancia que se determinó en el diseño para dicha

comunicación con obstáculos que fue 20 m, con el fin verificar que los paquetes llegaran a su destino confiablemente en la red ZIGBEE.

Cabe mencionar que en términos de simulación solo se utilizaron 10 nodos para validar la comunicación de la red diseñada en este proyecto (*el diseño presenta 25 nodos para cubrir el área de monitoreo*), ya que lo que se busca es comprobar el enrutamiento de los paquetes en dicha red.

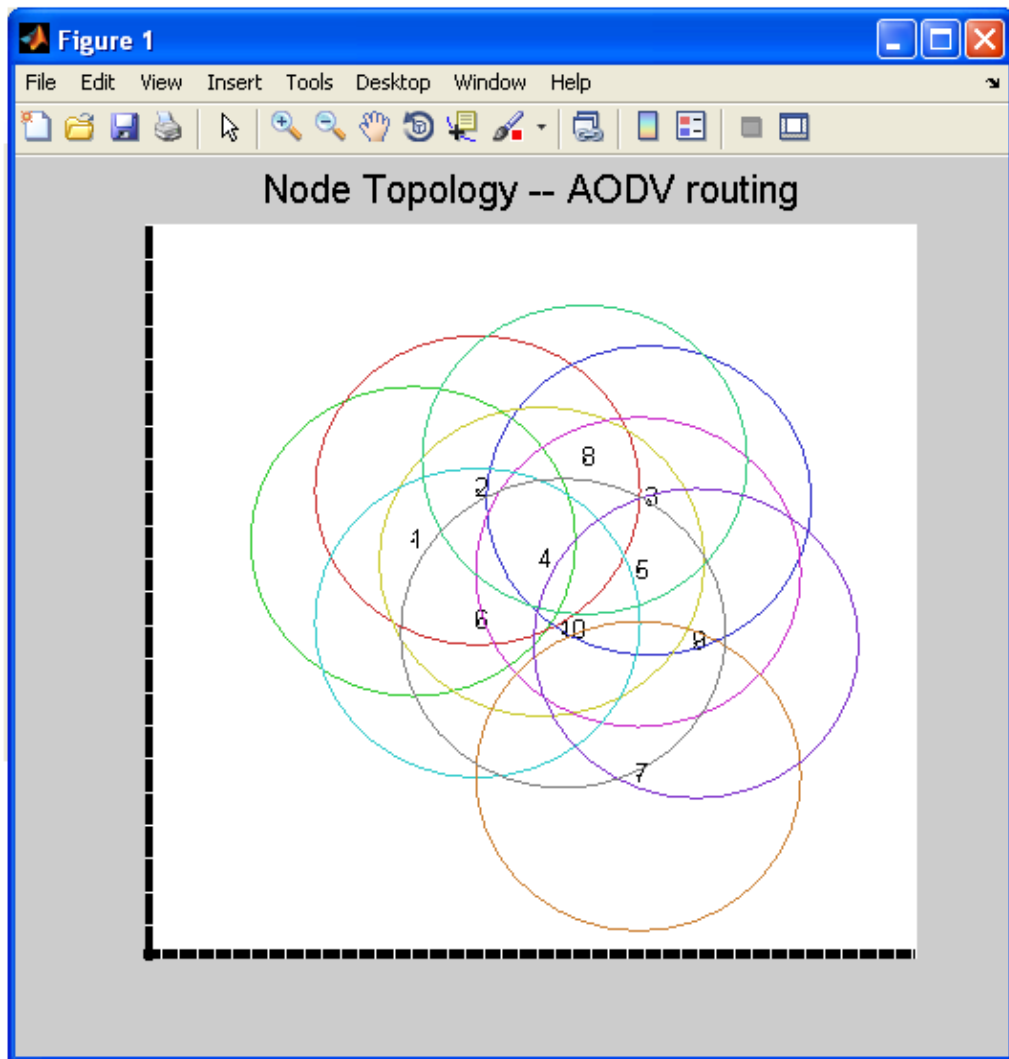
La figura 22 muestra el modelo de bloques en simulink con las modificaciones correspondientes ya realizadas, en la adición de los nodos 8-9-10 con sus respectivas coordenadas y la configuración de la red bajo el estándar Zigbee, con los parámetros del bloque True Time Wireless network ya definidos anteriormente.

Figura 22 Modelo de bloques – simulink de red inalámbrica



Al simular la red con esta configuración de parámetros se muestra la topología de red conformada con las posiciones cartesianas de los diez nodos y sus alcances respectivos de la señal, ver figura 23

Figura 23 Topología del modelo de bloques - simulink en True Time



Para analizar el enrutamiento de los mensajes en la red, se ha configurado la comunicación entre dos nodos para observar la forma como se encaminan los paquetes de datos entre el nodo fuente y el nodo destino en sus tiempos correspondientes y los eventos en la conectividad de todos los nodos que conforman la red.

En el algoritmo AODV se determina la forma como se encaminan los paquetes, entre los nodos de la red y un nodo que recolecta la información y por el cual se recoge dicha información generada normalmente en tiempo discreto, también denominado nodo *sink*.

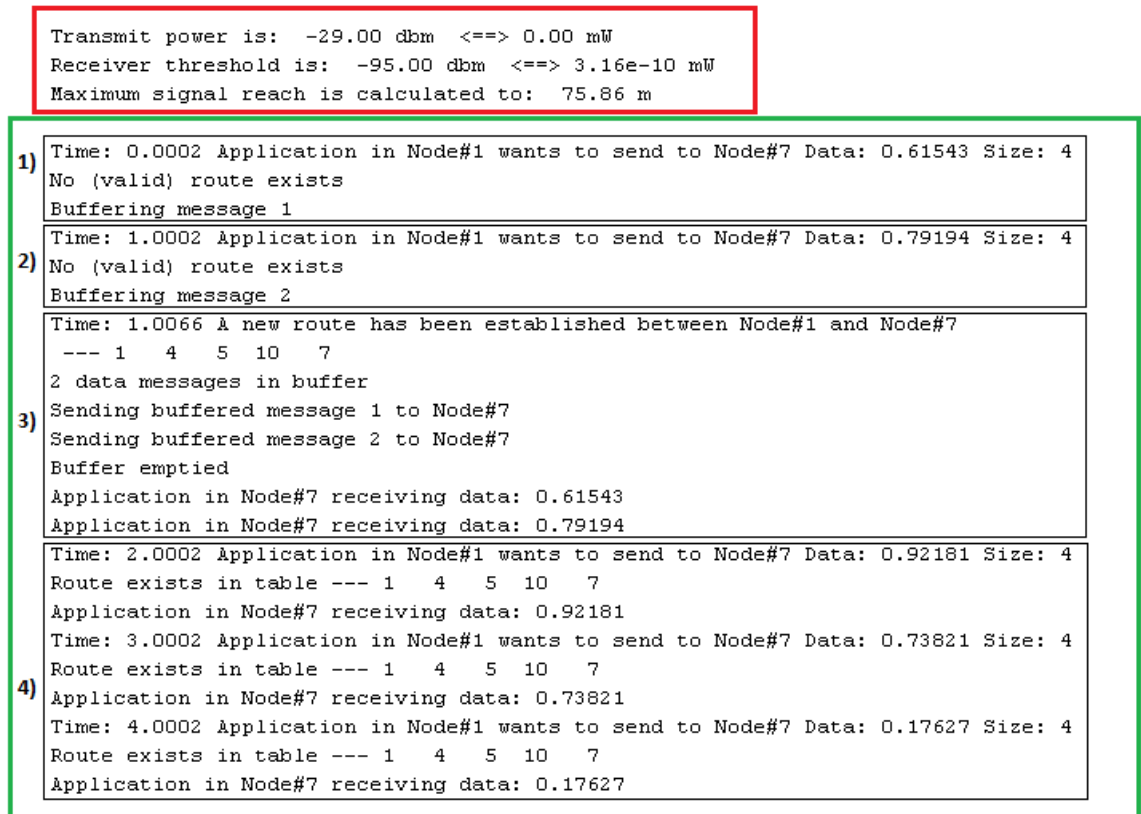
En el escenario de simulación se estableció el nodo 1 como el nodo fuente, que envía datos periódicamente al nodo de destino 7 o *sink* de la red (en el caso de Zigbee-nodo coordinador) con un periodo establecido de $t=1$ (para la simulación 1 min), la ruta que se establece es $1 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 10 \rightarrow 7$ ya que el

algoritmo de enrutamiento busca la ruta más corta para la transmisión de los datos en un periodo de tiempo. En la figura 24 en el recuadro verde, se pueden observar las impresiones en la ventana de comandos del Matlab las cuales describen las acciones en la capa de AODV con más detalle así:

- ❖ El primer evento indica la solicitud de envío de un mensaje datos del nodo 1 al nodo 7 (coordinador) en un tiempo determinado y la inexistencia de una ruta para enviar dichos datos, por lo que el mensaje es almacenado en un buffer a la espera de la formación de una ruta.
- ❖ A continuación, para el segundo evento aún no se establece la ruta la ruta y este segundo mensaje también es almacenado en el buffer a la espera de una ruta.
- ❖ En el tercer evento el algoritmo ya ha encontrado y establecido la ruta más corta entre el nodo origen 1 y el nodo destino 7 para él envió de los paquetes, de esta forma se envían los dos mensajes de datos del evento 1 y 2 almacenados en el buffer. Después se muestra un mensaje de buffer vacío indicando que se han enviado los dos mensajes al destino, y luego de que han llegado, la aplicación envía una confirmación de la recepción de dichos mensajes en el nodo 7 de destino.
- ❖ Por último en el evento 4, ya que se ha establecido la ruta y almacenado en la memoria del nodo origen, los datos que se envían del nodo 1 al 7, siguen está directamente y reciben las confirmaciones de recepción del nodo destino, estableciendo de esta forma una comunicación directa entre estos nodos, si esta ruta se mantiene.

En caso de que uno de los nodos de la ruta se caiga, la red tendrá que repetir el proceso de búsqueda de la ruta más corta entre origen y destino, que se describió en los 4 pasos anteriores.

Figura 24 Acciones en capa de AODV



Dentro de las configuraciones que se realizaron en la simulación se estableció, la potencia de transmisión de la señal a -29dbm y la sensibilidad del receptor a -95dbm, parámetros que se encuentran configurados en el módulo de radio de los microcontroladores CC2530, utilizados durante el proyecto para realizar pruebas en el diseño real de la red de sensores. Ver recuadro rojo Figura 24.¹⁹

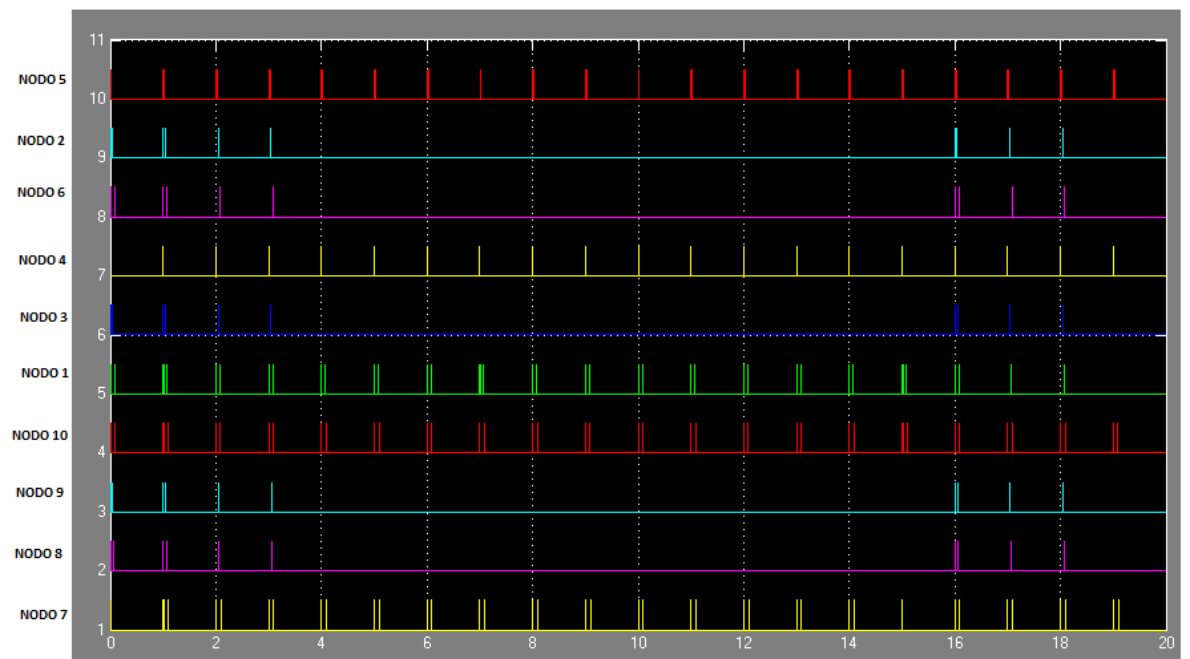
Para observar el envíos de datos de los nodos, se muestra en la figura 25 una representación en el tiempo del envío de los datos, que están transmitiendo los nodos de la ruta creada $1 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 10 \rightarrow 7$ para el análisis de AODV, y de la misma forma se muestran los nodos que no están enrutando paquetes, los cuales pasan a estado de desconexión con los demás.

Cada nodo de la figura 23 se encuentra representado en la figura 25 en el diagrama de tiempos de transmisión, donde se muestran los nodos de la red en el eje Y y en el eje X los tiempos (ms) en los cuales establecen la ruta de transmisión $1 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 10 \rightarrow 7$ explicada en la figura 24. Al iniciar el

¹⁹ PACKETMICRO. (s.f.). *ZigBee (IEEE 802.15.4) Module*. [en línea] [consultado Febrero de 2013], disponible en internet: <http://www.packetmicro.com/ZigBee.html>

descubrimiento de la ruta más corta entre los puntos 1 y 7 todos los nodos se encuentran transmitiendo para consultar con sus vecinos la ruta más cercana para él envió de los mensajes de 1 a 7 entre los tiempos 0 a 3ms . Ya cuando se ha establecido la ruta, los nodos que no se incluyen en esta ruta dejan de transmitir como lo son 2-6-3-9-8, permitiendo que los mensajes salten a través de los nodos que están en transmisión directa 1-4-5-10-7 entre los tiempos 4 y 16ms.

Figura 25 Tiempos de envío de los nodos



5. DISEÑO DEL NODO DE LA RED DE SENSORES

En este capítulo se presenta el diseño del nodo de la red de sensores que cumple con los requisitos de la aplicación, incluido el diseño de la etapa de instrumentación para la medición de las variables seleccionadas; se presentan los diseños realizados en CadsoftEagle (PCB), tales como el Layout y el esquemático del mismo.

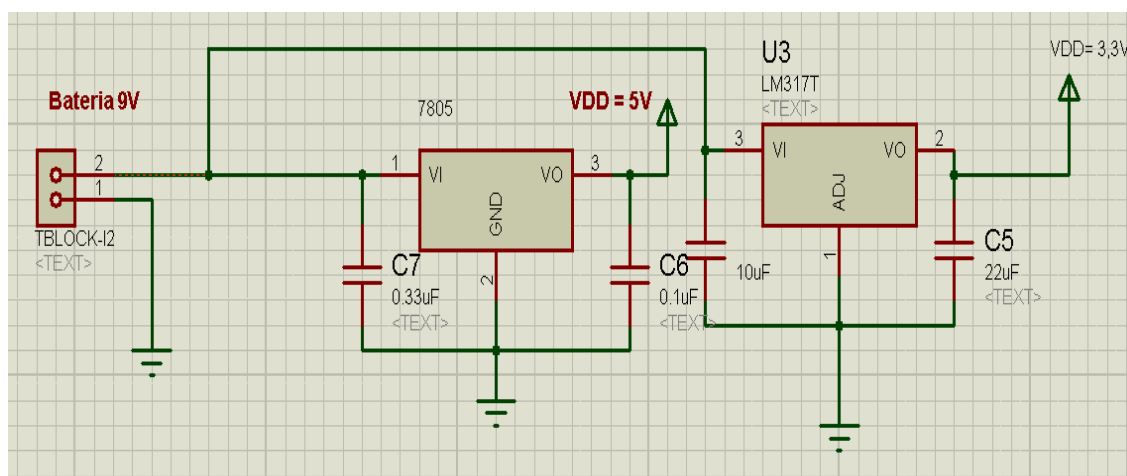
En el Anexo 1 se presentan unas definiciones que permiten entender los conceptos básicos utilizados para la selección de los elementos de instrumentación utilizados en el diseño del nodo.

4.1 ALIMENTACIÓN DEL NODO

Una de las características importantes del nodo es su portabilidad, por esta razón la forma en la que se alimenta el nodo es de vital importancia, debido a esto se optó por hacer uso de baterías ya que se facilita su manejo en el campo.

Para implementar la solución de alimentación del nodo se utilizó una batería de 9V y un par de reguladores fijos, un LM7805 para regular el voltaje a 5V y de esta manera alimentar el microcontrolador y un LD1117 para regular a 3,3V y poder alimentar el sensor y el módulo Xbee (Antena); la necesidad de una pila de 9V se debe a que para poder regular 5V fijos se necesitan como mínimo 2 voltios por encima del que se necesita asegurar, las conexiones se ven en la figura 26

Figura 26 Alimentación del Nodo2



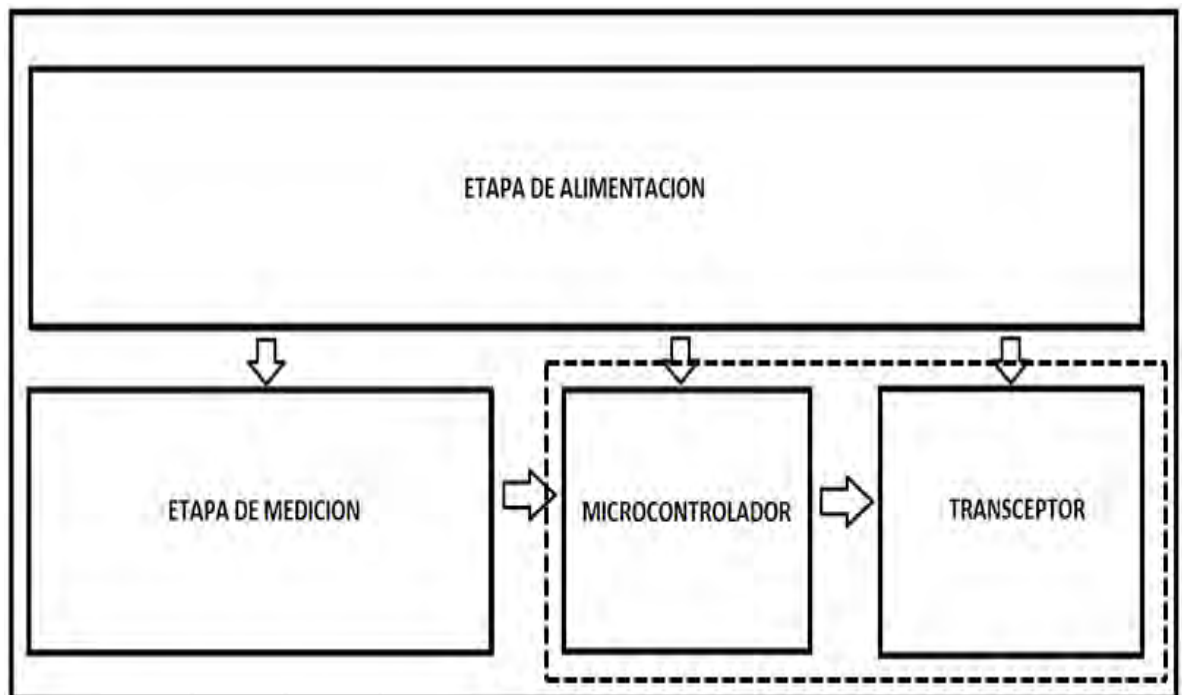
5.2. SELECCIÓN DE VARIABLES Y REQUERIMIENTOS

Del amplio rango de las variables que se pueden sensar, se procedió a establecer un caso de estudio en el que se decidió que variables son necesarias para dar solución a la problemática planteada desde el grupo de investigación de administración ambiental de la universidad. Las variables seleccionadas por los investigadores del grupo de investigación en estudios ambientales para desarrollo sostenible GEADES fueron Temperatura y Humedad Relativa. Respecto a la sensibilidad en la medición establecieron décimas. Finalmente, el rango de temperatura se estableció entre 0°C y 80°C, y la humedad Relativa entre 0%RH y 100%RH.

5.3. DISEÑO DEL NODO

La arquitectura general del nodo se presenta en la figura 27

Figura 27 Arquitectura general del nodo de la WSN



Para el diseño del nodo se tuvo en cuenta los microcontroladores y sensores ofrecidos en el mercado entre los cuales se hizo la selección de los más adecuados para el proyecto.

5.3.1. Selección del sensor. Para la selección del sensor se consultaron algunos sensores comerciales que cumplan con los rangos y restricciones definidas para el caso de estudio, y se compararon en la tabla 2, escogiendo así el sensor SHT71 que es el sensor que más se ajusta a las necesidades del proyecto, y tiene integrado el sensor de humedad y de temperatura en un solo encapsulado.

Cuadro 2. Sensores comerciales

sensores	temp	hum	tem/hum	Rango	Precision	Resolucion	Precio
DHT11			x	0-50°C /20-90%RH	±2°C /±5%RH	1°C/1%RH	13,64 USD\$
RTD con platino	x			-200 a 900°C	±1°C	0,01°C	65,02- 130,04USD\$
Lm35	x			-55 a 150°C	±5°C	0,5°C	1,47 USD\$
HH-4000-001		x		0-100%RH	±3.5%RH	1%RH	33,81 USD\$
SHT71			x	-40 a 123,8°C/0-100RH	±0,4°C/±3.0RH	0,01°C/0,005%RH	60,14 USD\$
HS1101		x		0-100%RH	±2%RH	1%RH	6,25 USD\$

Como se puede observar en las siguientes tablas, el sensor tiene una resolución de 0.05%RH y 0.01°C a 12 bit, una precisión de ±3.0%RH y ±0.4°C. Permite la medición de la temperatura desde los -40°C hasta 123°C, y la humedad tiene un rango de operación desde 0%RH hasta 100%RH.

Cuadro 3. Características técnicas sensor sht71 (humedad).²⁰

Relative Humidity					
Parameter	Condition	min	typ	max	Units
Resolution ¹		0.4	0.05	0.05	%RH
		8	12	12	bit
Accuracy ² SHT71	typ		±3.0		%RH
	max	see Figure 2			
Accuracy ² SHT75	typ		±1.8		%RH
	max	see Figure 2			
Repeatability			±0.1		%RH
Hysteresis			±1		%RH
Nonlinearity	raw data		±3		%RH
	linearized		<<1		%RH
Response time ³	tau 63%		8		s
Operating Range		0		100	%RH
Long term drift ⁴	normal		< 0.5		%RH/yr

²⁰ SENSIRION, T. (s.f.). DATASHEET SHT71.).[en línea] [consultado diciembre de 2013], disponible en internet: http://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/Humidity/Sensirion_Humidity_SHT7x_Datasheet_V5.pdf

Cuadro 4. Características técnicas sensor sht71 (temperatura).²¹

Temperature

Parameter	Condition	min	typ	max	Units
Resolution ¹		0.04	0.01	0.01	°C
		12	14	14	bit
Accuracy ² SHT71	typ		±0.4		°C
	max	see Figure 3			
Accuracy ² SHT75	typ		±0.3		°C
	max	see Figure 3			
Repeatability			±0.1		°C
Operating Range		-40		123.8	°C
		-40		254.9	°F
Response Time ⁶	tau 63%	5		30	s
Long term drift			< 0.04		°C/yr

A continuación se presenta la sensibilidad que tiene el microcontrolador con respecto al sensor (temperatura que tiene que aumentar para que cambie un bit en el microcontrolador)

- **Sensor de temperatura**

$$\Delta T/\text{bit} = (V_{\text{max}} - V_{\text{min}})/2^n = (123.8^\circ\text{C} - (-40^\circ\text{C}))/256 = 0.63^\circ\text{C/bit}$$

- **Sensor de Humedad**

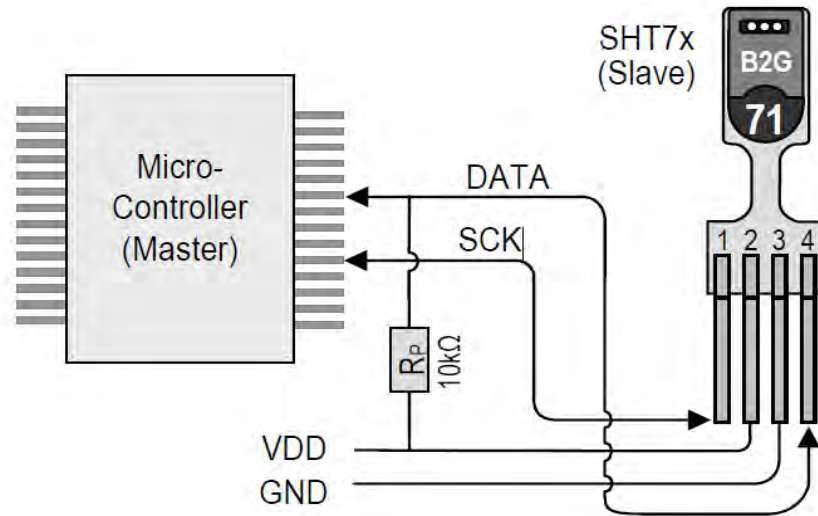
$$\Delta T/\text{bit} = (V_{\text{max}} - V_{\text{min}})/2^n = (100\%\text{RH} - 0\%\text{RH})/256 = 0.39\text{RH/bit}$$

La instrumentación necesaria para conectar el sensor se presenta en la figura 28, según la hoja de datos del fabricante.

²¹ Ibid. Disponible en

internet:http://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/Humidity/Sensirion_Humidity_SHT7x_Datasheet_V5.pdf

Figura 28 Conexión típica del sensor SHT71 al microcontrolador



5.3.2. Selección del microcontrolador Diseño1. Para la selección del microcontrolador que se implementó en el nodo, se analizaron las familias de los fabricantes más representativos en el desarrollo de tecnología para redes de sensores, Texas Instruments, Microchip y Freescale.

Uno de los criterios de selección para hacer más específica la búsqueda fue que los dispositivos utilizaran el estándar Zigbee RF4CE (2,4 GHz), el cual fue seleccionado como protocolo de comunicaciones para la implementación de la solución. el bajo consumo es parte importante del diseño por lo tanto es otro criterio de selección, debido a que en los nodos no se guarda información, tener una capacidad de memoria tan alta no es relevante.

Inicialmente se seleccionaron 3 posibles microcontroladores de cada familia de fabricante, posteriormente se seleccionó uno por empresa y por último se compararon entre ellos para seleccionar el microcontrolador que más se ajustara a los requerimientos de la aplicación.

- TEXAS INSTRUMENTS

En la tabla 5 se presenta una comparación entre tres microcontroladores ofrecidos por esta empresa.

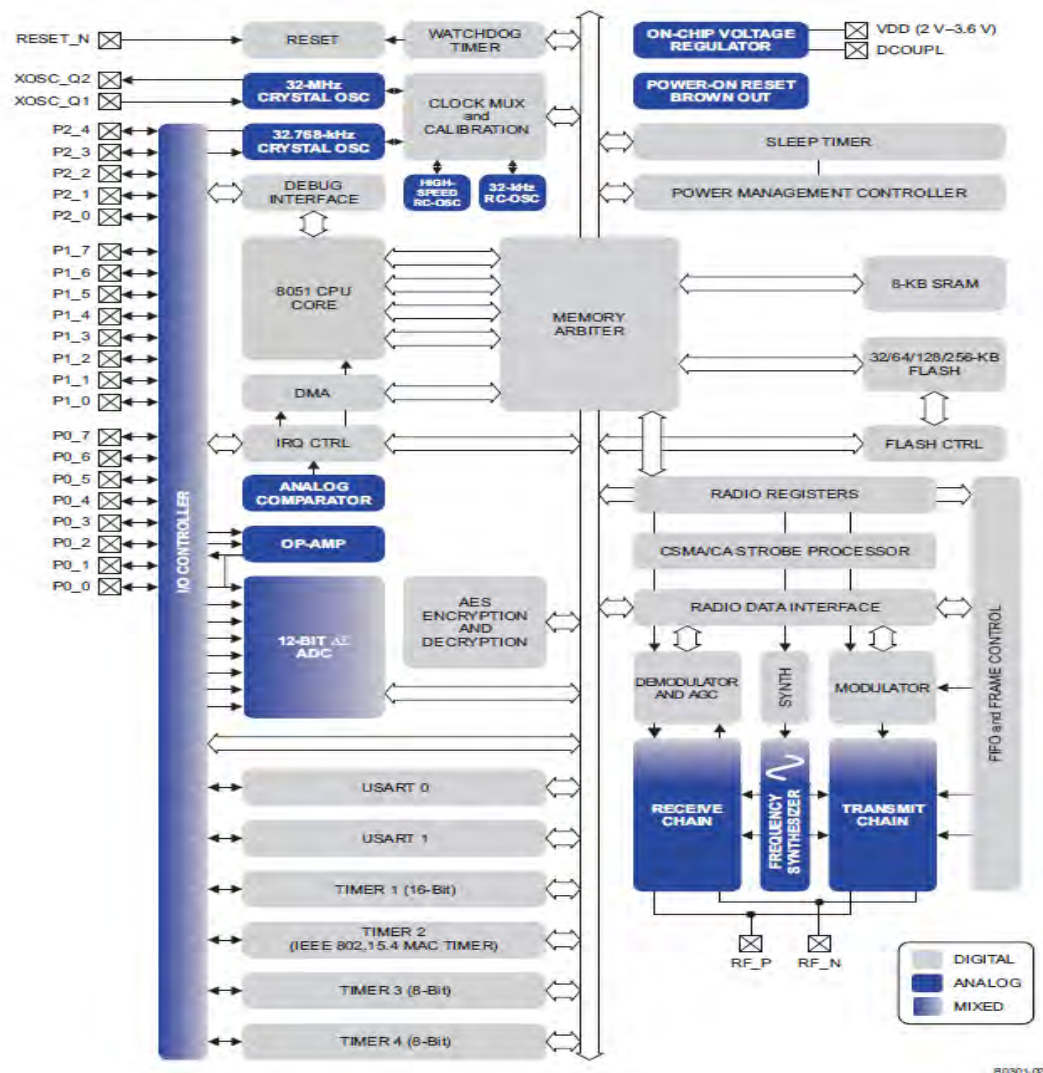
Cuadro 2. Microcontroladores de texas instruments [19]

	CC2530			CC2530ZNP			CC2531			
Parámetros	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Unidades
Condiciones de funcionamiento										
Rango de frecuencia	2400	—	2483.6	2400	—	2483.6	2400	—	2483.6	MHz
Temperatura de funcionamiento	-40	—	125	-40	—	125	-40	—	125	°C
Suministro de voltaje para funcionamiento	2.0	—	3.6	2.0	—	3.6	2.0	—	3.6	V
Radio bit de frecuencia	—	250	—	—	250	—	—	250	—	kBaud
Sensibilidad del receptor	—	-97	—	—	-97	—	—	-97	—	dBm
Rechazo del canal adyacente	—	49/49	—	—	49/49	—	—	49/49	—	dB
Rechazo del canal alterno	—	57/57	—	—	57/57	—	—	57/57	—	dB
Bloqueo	—	57/57	—	—	57/57	—	—	57/57	—	dB
Potencia nominal de salida en modo TX	—	+4.5	—	—	+4.5	—	—	+4.5	—	dBm
Consumo de corriente										
MCU activo y modo RX	—	25	—	—	25	—	—	25	—	mA
MCU activo y modo RX + 4dBm	—	34	—	—	34	—	—	34	—	mA
Modo de alimentación 1	—	105	—	—	105	—	—	105	—	µA
Modo de alimentación 2	—	1	—	—	1	—	—	1	—	µA
Modo de alimentación 3	—	0.4	—	—	0.4	—	—	0.4	—	µA
Despertador y calendario										
De modo de alimentación 2 o 3 para activación	—	120	—	—	120	—	—	120	—	µs
De activo a RX o TX	—	192	—	—	192	—	—	192	—	µs

El CC2530 es un System-on-Chip, de bajo coste, bajo consumo, compatible con ZigBee / PRO ZigBee, ZigBee RF4CE, 6LoWPAN; así como una excelente sensibilidad del receptor y robustez a la interferencia, cuatro modos de energía, un amplio conjunto periférico que incluye 2 USARTs, 12-Bit ADC, y 21 GPIO de propósito general, tiene hasta 256 KB de memoria flash, 8-kB de RAM para aplicaciones complejas, consumo de corriente muy bajo en RX, TX, y múltiples modos de potencia baja que permite que la batería sea de larga duración. Posee un transceiver de 2.4 GHz. Apoya la comunicación inalámbrica de potencia baja por medio de un excelente rendimiento RF y selectividad, además se soporta en un núcleo del estándar industrial 8051 MCU.

Al comparar los microcontroladores que ofrece Texas Instruments se aprecia que el CC2530 ofrece un mayor rendimiento del RF, una memoria flash de hasta 256kB, lo que permite, en comparación con otros microcontroladores, almacenar más información. El CC2530 tiene una configuración interna que se muestra en la figura 29 y viene en cuatro versiones diferentes: CC2530-F32/64/128/256, 32/64/128/256-KB de memoria flash respectivamente. Para la realización de este proyecto es suficiente con la utilización del microcontrolador CC2530F64, ya que posee una memoria flash de 64kb lo es suficientemente capaz para almacenar la información que necesitamos, además tiene bajo precio (\$2.90), alta velocidad, reducido consumo de energía, es de tamaño reducido y fácil de programar.

Figura 29 Diagrama de bloques con la organización interna del CC2530. ²²



- Freescale

De los microcontroladores específicamente diseñados para conectividad inalámbrica, la empresa Freescale ofrece los siguientes:

- ✓ MC13211: 2.4 GHz RF transceiver and 8-bit MCU with 16K Flash
- ✓ MC13212: 2.4 GHz RF transceiver and 8-bit MCU with 32K Flash
- ✓ MC13213: 2.4 GHz RF transceiver and 8-bit MCU with 60K Flash
- ✓ MC13201: 2.4 GHz RF Transceiver
- ✓ MC13202: 2.4 GHz RF Transceiver
- ✓ MC13224V: 2.4 GHz Platform in a Package (PIP) - 32-bit TDMI ARM7 processor with 128KB Flash, 96KB RAM, 80KB ROM

²² INSTRUMENT, T. (s.f.). MICROCONTROLADORES.).[en línea] [consultado diciembre de 2013], disponible en internet:http://www.ti.com/ww/mx/prod_mcu.html

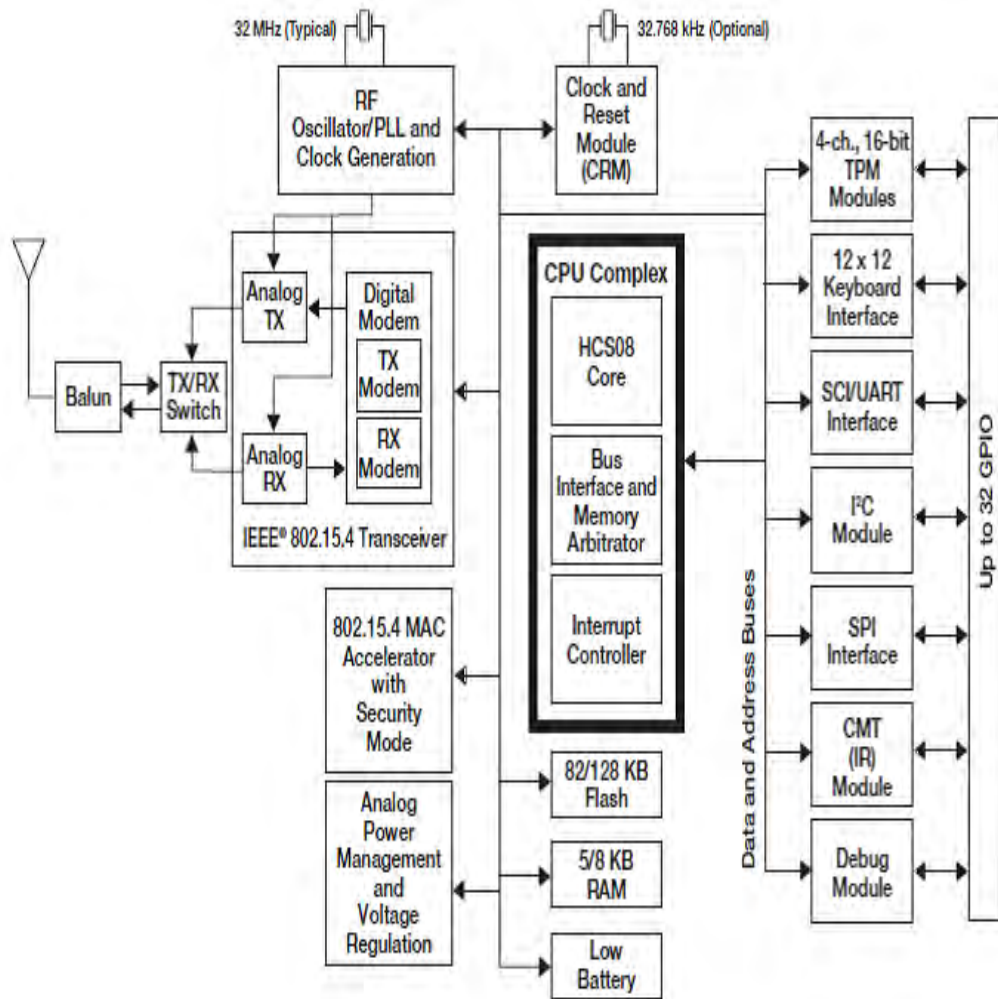
- ✓ MC13226V: 2.4 GHz Platform in a Package (PIP) for ZigBee Pro applications
- ✓ MC13233: 2.4 GHz System-on-Chip with S08 MCU

Solo el MC13233 ofrece un microcontrolador que integran todos o gran parte de los módulos en un único chip, igualmente ofrece un procesador más potente y complejo que facilita la realización de la aplicación considerada en este trabajo, mientras que los microcontroladores *transceiver* son solo un transmisor/receptor de señales de radio frecuencia (RF) que sirve para conectar aparatos por vía inalámbrica.

El MC13233 esta optimizado para aplicaciones de bajo consumo. El transceiver del MC13233 system-on-chip (SoC) es de 2,4 GHz y ofrece 16 canales con una separación de 5 MHz; el transceiver proporciona una velocidad de 250 kbps. La potencia de salida es programable desde -30 dBm a 2 dBm, con una sensibilidad de recepción <-94 dBm. Su RAM es de 5 KB y tiene 82 KB de memoria flash que ofrece hasta 10.000 ciclos de programa / borrado. Por último, el Sistem-on-chip MC13233 el cual tiene una configuración interna mostrada en la figura 30, simplifica el diseño de red inalámbrica para permitir a diseñadores de sistemas que no tengan experiencia en soluciones de RF garantizar un diseño sólido y optimizado al mismo tiempo que incorpora la funcionalidad inalámbrica en sus productos finales.

Figura 30 Diagrama de bloques con la organización interna del MC13233.²³

²³ FREESCALE. (s.f.). MC1323x 2.4GHz IEEE 802.15.4/ZIGBEE SYSTEM-ON-CHIP SOLUTION. Recuperado el ABRIL de 2012, de http://cache.freescale.com/files/wireless_comm/doc/fact_sheet/MC1323XFS.pdf?fsp=1



- Microchip

En el cuadro 6 se presenta una comparación entre tres microcontroladores ofrecidos por esta empresa.

Cuadro 3 Microcontroladores de microchip

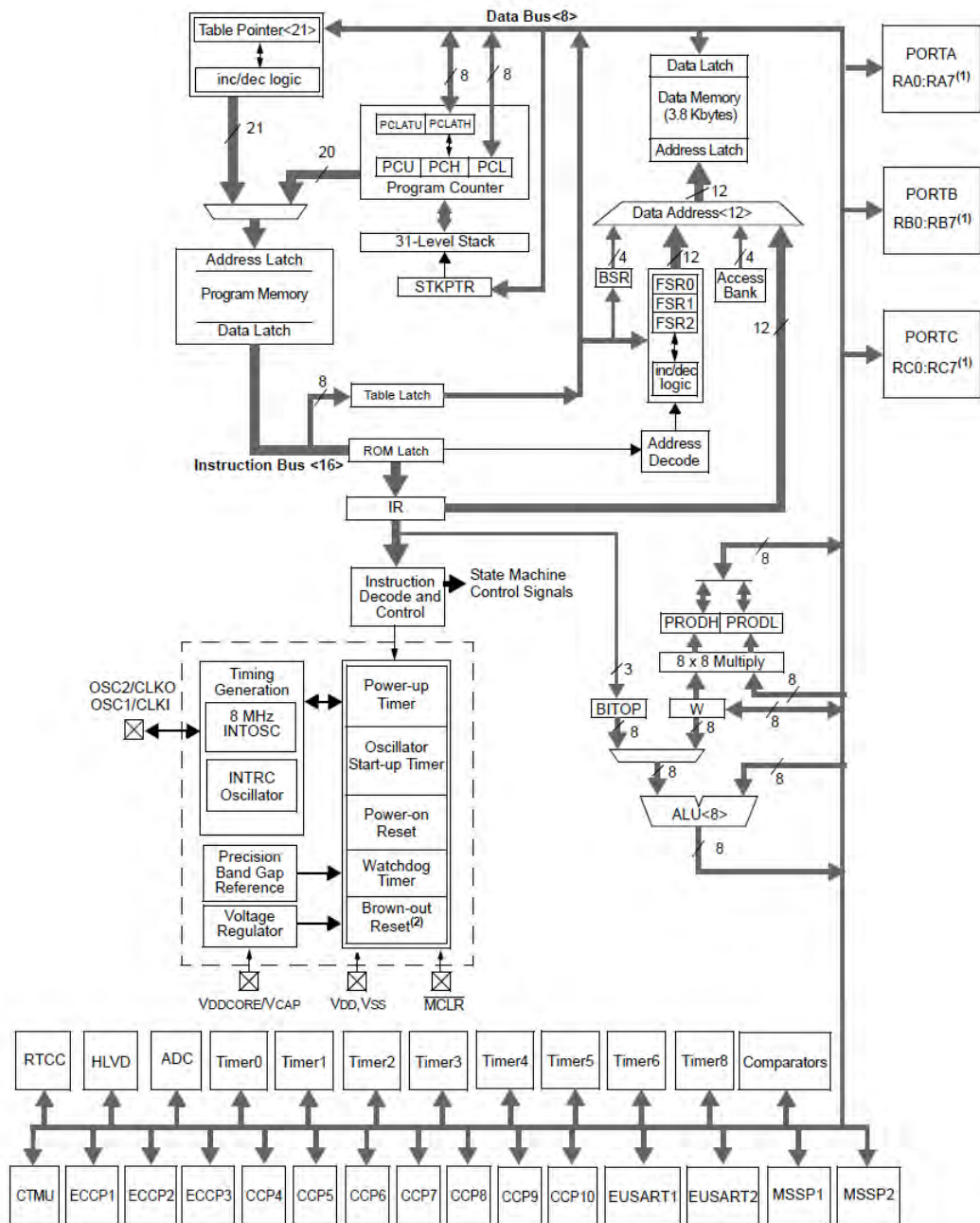
	PIC18F46J13	PIC18F45K20	PIC18F65K22
Parameter Name	Value	Value	Value
Program Memory Type	Flash	Flash	Flash
Program Memory (KB)	64	32	32
CPU Speed (MIPS)	12	16	16
RAM Bytes	3,800	1,536	2,048
Digital Communication Peripherals	2-A/E/USART, 2-MSSP(SPI/I2C)	1-A/E/USART, 1-MSSP(SPI/I2C)	2-A/E/USART, 2-MSSP(SPI/I2C)
Capture/Compare/PWM Peripherals	7 CCP, 3 ECCP	1 CCP, 1 ECCP	5 CCP, 3 ECCP
Timers	4 x 8-bit, 4 x 16-bit	1 x 8-bit, 3 x 16-bit	4 x 8-bit, 4 x 16-bit
ADC	13 ch, 12-bit	13 ch, 10-bit	16 ch, 12-bit
Comparators	3	2	3
Temperature Range (C)	-40 to 85	-40 to 125	-40 to 125
Operating Voltage Range (V)	2 to 3.6	1.8 to 3.6	1.8 to 5.5
Pin Count	44	40	64
XLP	Yes	Yes	Yes
Cap Touch Channels	13	14	16
Precio	\$3.58	\$2.55	\$3.74

De microchip el microcontrolador que más se ajusta a los requisitos de la aplicación es el PIC18F46J13 debido a las características que posee, en la figura 31 se muestra la organización interna de este microcontrolador las cuales fueron superiores a los otros dos microcontroladores que ofrece esta empresa.

Entre las características que presenta podemos resaltar que:

- Es de bajo consumo y alto rendimiento, posee un 8-bit MCU con memoria de alta densidad.
- Posee modos de bajo consumo de potencia, y consumo de 200nA Modo de espera (retención de memoria RAM).
- Hardware RTCC para aplicaciones críticas en tiempo.
- 2 puertos serie para MSSP SPI o I2C.
- 2 módulos USART.
- 8-bits de puerto paralelo.
- Tres comparadores analógicos.
- 10 canales ADC de 12-bit.

Figura 31 Organización interna del microcontrolador PIC18F46J13. [26]



Después de presentar las diferentes alternativas que ofrecen actualmente las empresas, se procede a escoger y a comparar el mejor microcontrolador de cada una de ellas para proceder a escoger solo uno y presentar las razones por las que se escogió.

En el cuadro 7 se presentan las características relevantes que más satisfacen los requerimientos para la selección del microcontrolador.

Cuadro 4. Comparación de los microcontroladores elegidos por cada empresa

<i>Características</i>	<i>CC2530F64 (Texas Instrument)</i>	<i>MC13233 (Freescale)</i>	<i>PIC18F46J13 (Microchip)</i>
<i>Tipo de memoria</i>	Flash	Flash	Flash
<i>Memoria(kb)</i>	64	82	64
<i>RAM Bytes</i>	8	5	3,8
<i>Transceiver</i>	2,4 GHz	2,4 GHz	No
<i>comunicación digital periférica</i>	2-USART, 2-MSSP(SPI/12C)	2-USART, 2-MSSP(SPI/12C)	2-USART, 2-MSSP(SPI/12C)
<i>timers</i>	4 x 8-bit	4 x 8-bit	4 x 8-bit, 4 x 16-bit
<i>ADC</i>	8 ch, 7 a 12 bits	8 ch, 10 bits	13 ch, 12-bit
<i>Rango de temperatura</i>	- 40 a 125 °C	- 40 a 85 °C	- 40 a 85 °C
<i>Suministro de voltaje para funcionamiento</i>	2 a 3,6	1,8 a 3,6	2 a 3,6
<i>Whatchdog</i>	Si	No	Si
<i>Sensor analogo de temperatura</i>	Si	No	No
<i>Precio</i>	\$2.90	\$2.99	\$3.58

El microcontrolador que más satisface todos los requerimientos es el CC2530f64 de Texas Instruments por los siguientes argumentos:

- ❖ Proporciona suficiente documentación que respaldaba las características demandadas en el microcontrolador.
- ❖ Cuenta con múltiples herramientas de desarrollo como: CC2530 development kit, CC2530 ZigBee development kit, CC2530 RemoTI development kit for RF4CE, Smart Software, Packet Sniffer y IAR Embedded Workbench Available. Además es el más económico al compararlo con las otras dos compañías (freescale y microchip), Texas instrumens ofrecía mejores características a un precio adecuado.
- ❖ Para el procesamiento de datos se requería que el microcontrolador fuera lo suficientemente rápido al momento de procesar los datos, los cuales están relacionados con el procesamiento de variables de dinámica lenta, es por esto que un microcontrolador de 8 bit es suficiente.
- ❖ Posee una RAM 8-kB, que es de mayor capacidad que las de las otras dos empresas, y una memoria flash de 64kb que es menor capacidad que la del microcontrolador de freescale, pero que se ajusta a las necesidades de la aplicación propuesta.

- ❖ Tiene un sistema de ahorro de energía que permite una mayor duración de la batería con respecto a los otros dos microcontroladores, ya que su núcleo digital así como sus dispositivos periféricos son alimentados por un regulador de voltaje bajo de 1.8 V. esto ofrece funcionalidad de administración de energía que permite que trabaje con bajo consumo de energía aumentando la duración de la batería por medio de diferentes modos de energía.
- ❖ Posee un temporizador de desconexión, el cual es de ultra bajo consumo de energía, cuenta con un oscilador de cristal 32 kHz o oscilador RC de 32-kHz. El temporizador de apagado se ejecuta continuamente en todos los modos de funcionamiento, excepto el modo de alimentación de 3 (PM3). Este temporizador es aplicado como un contador en tiempo real o como un despertador para salir de los modos de bajo consumo de potencia.
- ❖ Su ADC soporta 12 bits de resolución, suficiente para el tipo de aplicaciones consideradas en esta área de aplicación.
- ❖ El ADC tiene la capacidad de automatizar el proceso de toma de muestras periódica o la conversión en una secuencia de canales, lo cual no es soportado por los otros dos microcontroladores.
- ❖ Tiene integrado un temporizador *watchdog* que permite que el CC2530 se reajuste en caso de fallos. Cuando es activado por el software, el mecanismo de vigilancia debe ser limpiado periódicamente, de lo contrario, se restablece el dispositivo cuando el tiempo de espera pasa. Como alternativa puede ser configurado para su uso general como un temporizador de 32-kHz.
- ❖ Finalmente tiene un sensor análogo de temperatura, el cual permite medir la temperatura ambiente, desde los -40 hasta los 125°C.

5.3.3. Desarrollo del diseño. Se realizaron dos diseños. El primer diseño se desarrolló utilizando el microcontrolador seleccionado, CC2530. A continuación se presentan el desarrollo del diseño que se llevó a cabo en el programa CadSoft Eagle PCB.

Figura 32 Diseño del Nodo en Eagle (Impreso)

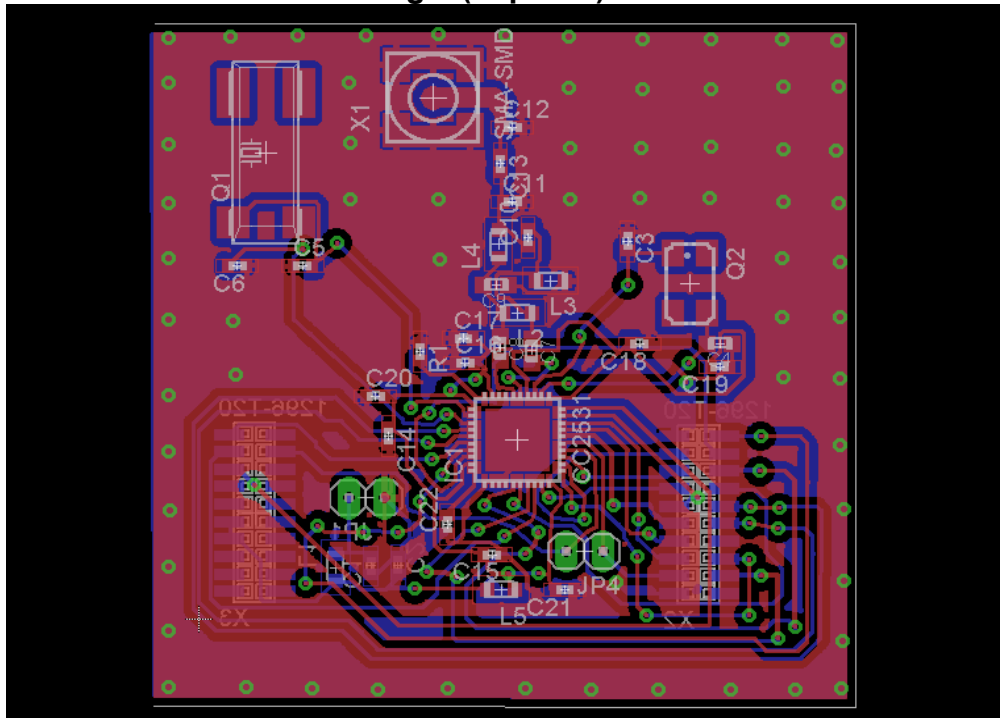
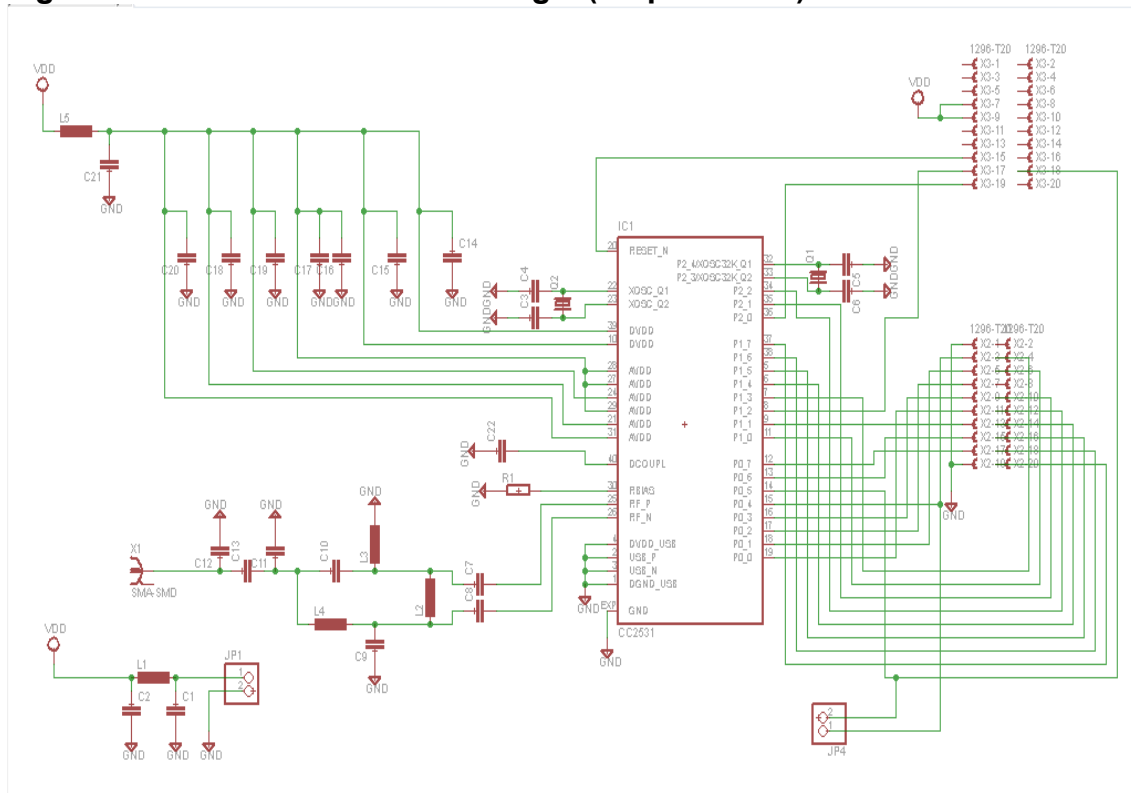


Figura 33 Diseño del Nodo 1 en Eagle (Esquemático)



La necesidad de un segundo diseño se debe a la gran dificultad para adquirir la totalidad de componentes necesarios para el montaje del nodo del diseño 1 según los proveedores consultados, principalmente en la etapa del transceptor. Para cumplir con el cronograma del proyecto se decidió migrar a otro diseño, en el que se tuviera certeza de adquirir los componentes rápidamente.

Para el segundo diseño se seleccionó un transceptor comercial que facilita el desarrollo de implementaciones de WSN sobre Zigbee, XBee. Este transceptor utiliza un puerto serie para comunicarse con un microcontrolador y transferir hacia y desde este toda la información que se transporta a través de la red.

El XBee es un módulo compatible con el estándar IEEE 802.15.4 para comunicación inalámbrica, solución que satisface las necesidades de bajo costo y bajo consumo de potencia para redes inalámbricas. Es fácil de usar, requiere poca energía y ofrece la entrega confiable de datos críticos entre los dispositivos. Su pequeño tamaño ahorra espacio [37]. Algunas de sus principales características son:

- Buen Alcance: hasta 300ft (100 mts) en línea vista para los módulos Xbee y hasta 1 milla (1.6 Km) para los módulos Xbee Pro.
- 9 entradas/salidas con entradas analógicas y digitales.
- Bajo consumo <50mA cuando están en funcionamiento y <10uA cuando están en modo sleep.
- Interfaz serial.
- 65,000 direcciones para cada uno de los 16 canales disponibles. Se pueden tener varios de estos dispositivos en una misma red.
- Fáciles de integrar. [16]

Existen 2 series de estos módulos. La serie 1 y la serie 2, o también conocida como 2.5. Los módulos de la Serie 1 y la Serie 2 tienen el mismo pin-out, sin embargo NO son compatibles entre sí ya que utilizan distintos chipset y trabajan con protocolos diferentes.

La serie 1 está basada en el chipset Freescale y está pensado para ser utilizado en redes punto a punto y punto a multipunto. Los módulos de la serie 2 están basados en el chipset de Ember y están diseñados para ser utilizados en aplicaciones que requieren repetidores o una red mesh. Ambos módulos pueden ser utilizados en los modos AT y API.

Cuadro 5. Comparación xbee. [8]

Características	Xbee Series 1	Xbee Series 2	Xbee Pro
Interior/urban rango	hasta 100 pies(30 m)	hasta 133 pies(40 m)	hasta 300 pies(90 m)
RF línea de vista en exteriores	hasta 300 pies(100 m)	hasta 400 pies(120 m)	hasta 1 Milla(1600 m)
Transmision de potencia de salida	1mV(0 dBm)	2mV(+3 dBm)	63mV(+18 dBm)
RF Data Rate	250 Kbps	250 Kbps	250 Kbps
Sensibilidad del receptor	-92 dBm(1%PER)	-98 dBm(1%PER)	-100 dBm(1% tasa de error de paquetes)
Tension de alimentacion	2,8 a 3,4 V	2,8 a 3,6 V	2,8 a 3,4 V
Transmision de corriente(típico)	45 mA(@3,3V)	40 mA(@3,3V)	250 mA(@3,3V)
Idle/Recepcion Corriente(típica)	50 mA(@3,3 V)	40 mA(@3,3 V)	55 mA(@3,3 V)
corriente de apagado	< 10 uA	< 1 uA	< 10 uA
Frecuencia	ISM de 2,4 Ghz	ISM de 2,4 Ghz	ISM de 2,4 Ghz
Dimensiones	0,0960" x 1,087"	0,0960" x 1,087"	0,0960" x 1,297"(2,438cm x 3,294cm)
Temperatura de funcionamiento	-40 a 85°C	-40 a 85°C	-40 a 85°C
Opciones de Antena	PCB,Integrated whip,U.FL,RPSMA	PCB,Integrated whip,U.FL,RPSMA	conector integrado whip,Chip o U.FL,RPSMA
Topologias de Red	Punto a punto, Estrella	Arbol	Malla
Numero de canales	16 canales de secuencia directa	16 canales de secuencia directa	12 canales de secuencia directa
Opciones de direccionamiento	PAN ID,Canales y origen/destino	PAN ID,Canales y origen/destino	PAN ID,Canales y direcciones

En el cuadro 8 se encuentra las características de la series 1, 2 y PRO de XBee; para este proyecto se decidió trabajar con la serie 2 PRO de XBee, ya que este maneja el mismo API y es compatible con la tecnología Zigbee de Texas Instrumens, facilitando luego la integración de nodos de ambos fabricantes.

Aunque las especificaciones de hardware son similares, las diferencias entre la serie XBee 1 y 2 son más evidentes en las características del firmware. A continuación se enumeran algunas de las diferencias más relevantes en el firmware:

- **802.15.4:** XBee Serie 1 viene con estándar 802.15.4 firmware para la configuración punto-punto o topología de estrella. Este firmware ofrece entradas ADC y digitales. El XBee 802.15.4 es significativamente más rápido que ZigBee y su rendimiento también es mucho mayor, siendo su máximo en la práctica de alrededor de 80kbps
- **Zigbee:** XBee Serie 2 no ofrece ningún firmware 802.15.4, sino que siempre se está ejecutando el Zigbee firmware para soportar arquitecturas mesh (o también denominadas malla). Los ZigBee XBee sobresalen en escenarios de muy baja potencia cuando se configuran como un dispositivo final. Sin embargo, la infraestructura de una red ZigBee es más compleja y requiere más configuración para implementarlo plenamente. [9]

5.3.4. Selección del microcontrolador del diseño 2

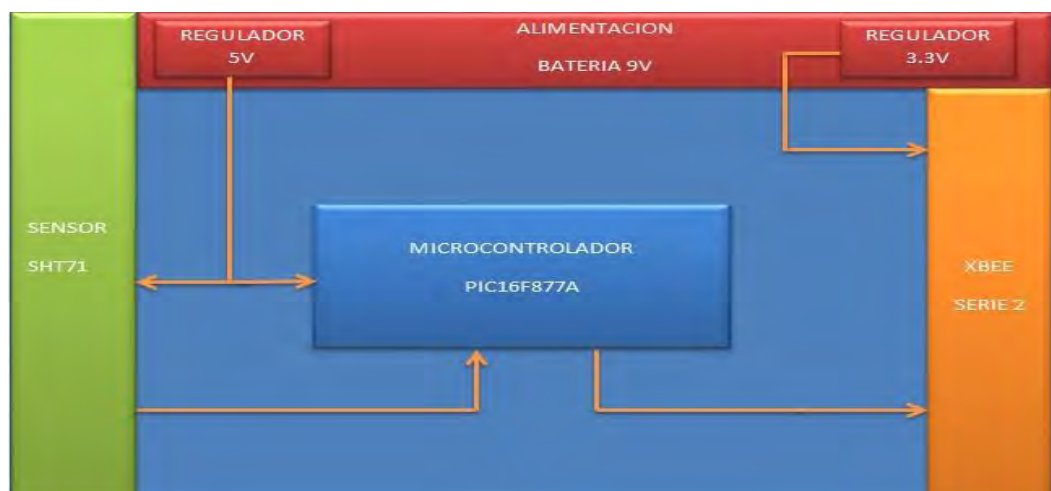
Para la selección del microcontrolador del diseño 2 se procedió a comparar el Pic16F887 y Pic18F4550, y se determinó que el microcontrolador Pic18F4550 es demasiado robusto para las características de nuestro proyecto y se estaría subutilizando, por lo que con un Pic16f887 basta para nuestra aplicación, la tabla de comparación se puede observar en el cuadro 9.

Cuadro 9. Comparación de los microcontroladores por familia

Características	pic16F887	pic18F4550
Tipo de memoria	Flash	Flash
Memoria(kb)	14	32
RAM Bytes	368	2,048
comunicación digital periférica	1-A/E/USART, 1-MSSP(SPI/I2C)	1-A/E/USART, 1-MSSP(SPI/I2C)
Timers	2 x 8-bit, 1 x 16-bit	1 x 8-bit, 3 x 16-bit
ADC	14 ch, 10-bit	13 ch, 10-bit
Rango de temperatura (°C)	-40 a 125	-40 a 85
Rango de voltaje de operación(V)	2 a 5,5	2 a 5,5
Whatchdog	Si	Si
Precio	3,27 USD\$	9,26 USD\$

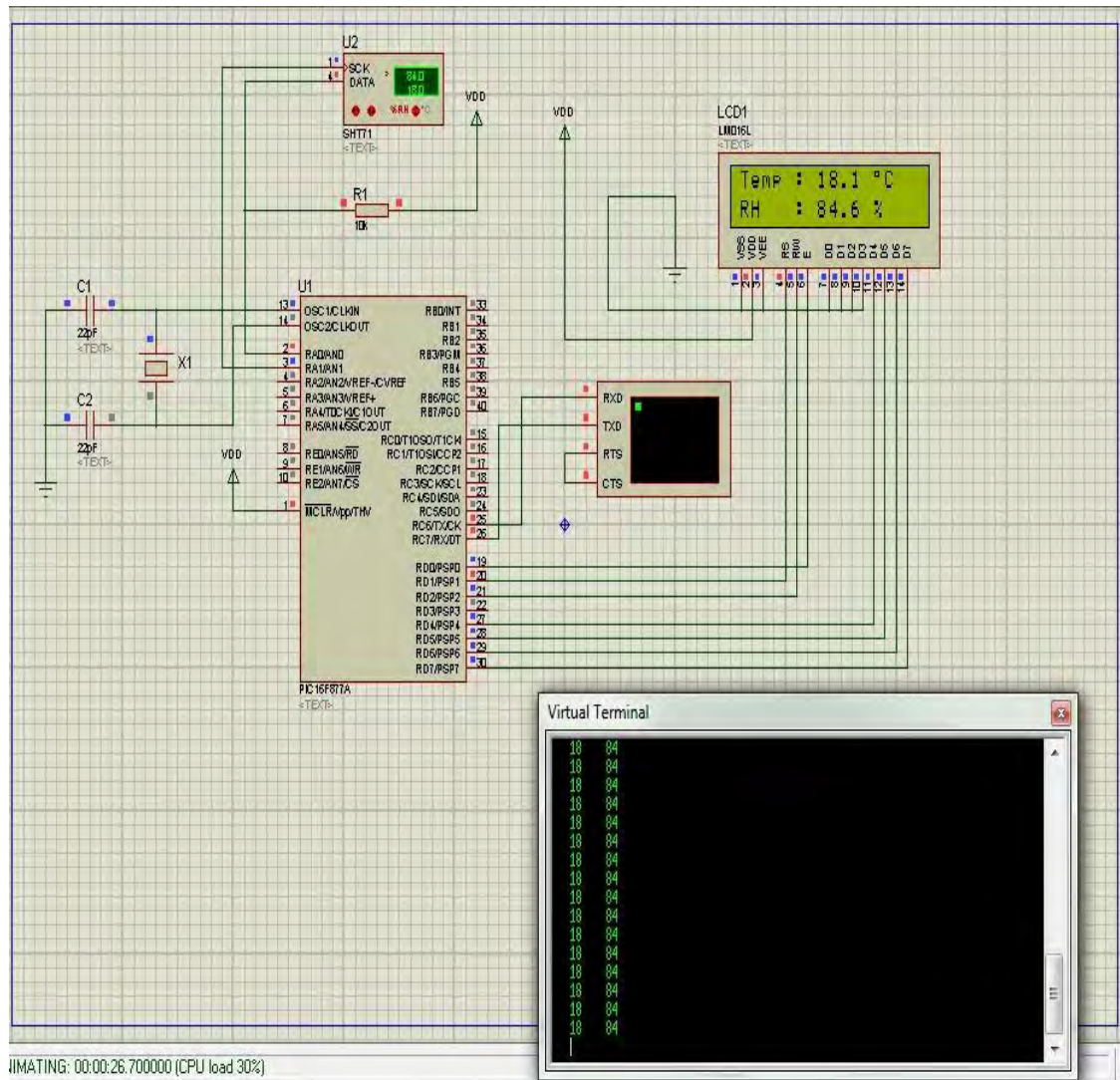
En el diagrama de bloques de la figura 34 se puede apreciar la distribución y composición de los componentes de los nodos necesarios para el diseño 2, que básicamente está compuesto por una batería de 9V, un microcontrolador PIC16F887A, un par de reguladores, uno a 5 v para alimentar el PIC y otro a 3.3V para alimentar el módulo Xbee PRO serie 2, y el sensor seleccionado.

Figura 34 Diagrama de bloques del diseño 2



5.3.5. Simulación diseño 2. En la figura 35 se muestra una simulación en proteus del diseño 2, la cual se realiza para validar las conexiones y el funcionamiento del PIC con un terminal serial que simula el XBEE serie 2 pro.

Figura 35 Simulación del nodo 2 (Proteus)



A continuación se presenta el desarrollo del diseño que se llevó a cabo en el programa CadSoft Eagle PCB

Figura 36 Diseño del nodo 2 en Eagle (Impreso)

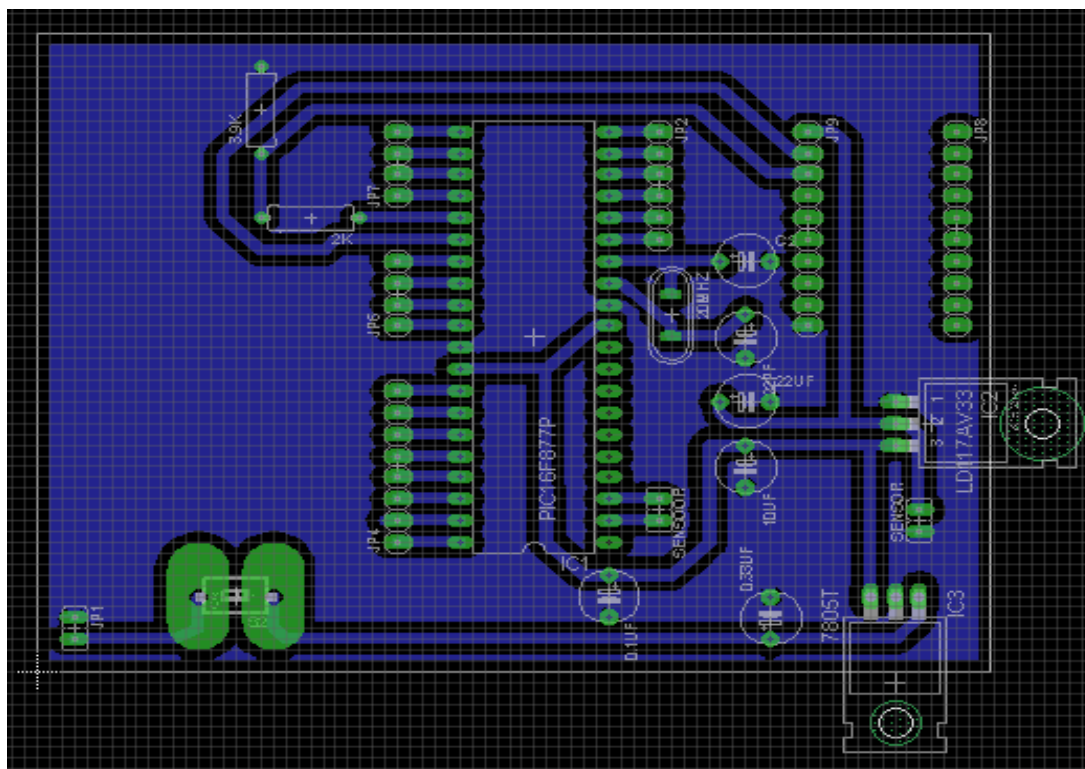
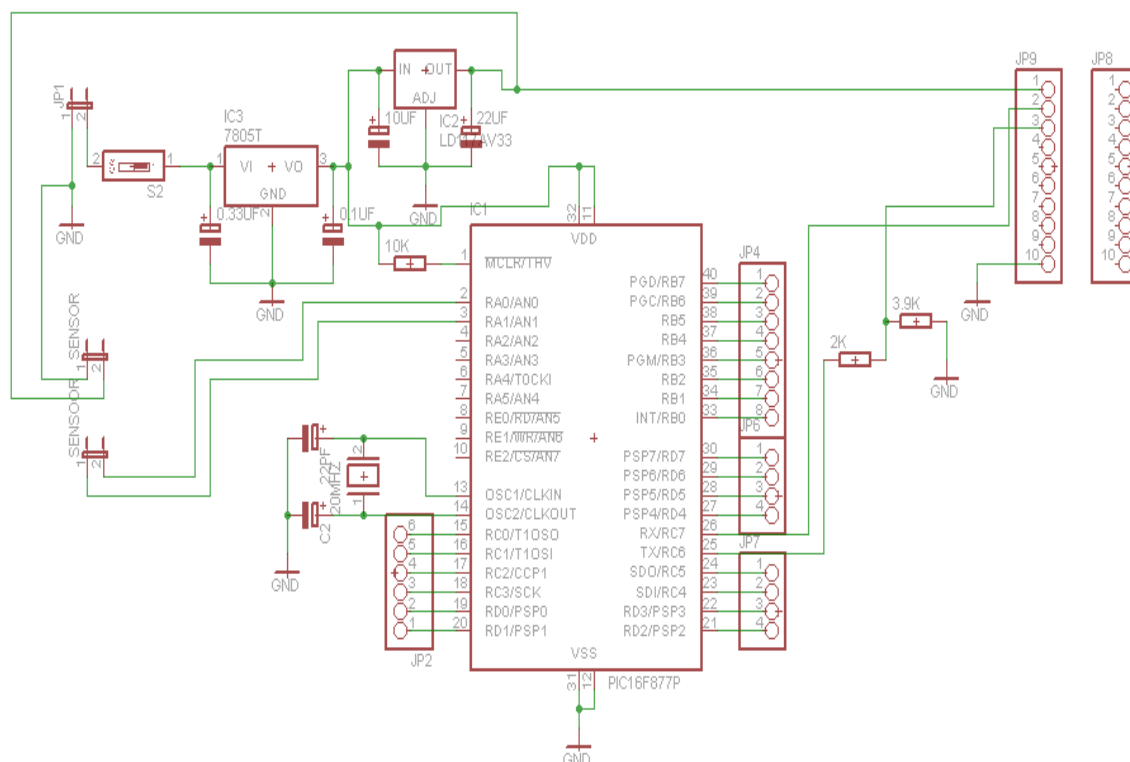


Figura 37 Diseño del Nodo 2 en Eagle (Esquemático)



Para realizar el diseño impreso del diseño 2, se tuvieron en cuenta una serie de características, por ejemplo que el microcontrolador quedara centrado respecto al resto de componentes del nodo debido a que de este se desprenden el resto de componentes a ser controlados, que el cristal quedara lo más cerca posible del microcontrolador para evitar ruido de tipo radiado ya que el pin del microcontrolador que conecta el cristal presenta alta impedancia, y además generar un plano de tierras, para evitar capacitancias parasitas.

6. KRIGING

Kriging es la técnica de interpolación utilizada en geoestadística. Su fortaleza estriba en el conocimiento del comportamiento de la variable en el espacio. Así, la forma del semivariograma nos indica la capacidad de predicción que tiene cada punto en función de la distancia que lo separa con otro punto. Los puntos más allá del rango, es decir cuando el semivariograma se vuelve plano, tienen la mínima capacidad predictora. En el momento de aplicar Kriging hay que, además de suministrar los parámetros del semivariograma isotrópico o los anisotrópicos, decidir la estrategia adecuada para la selección de puntos para la interpolación.

Si el número de valores en el espacio es suficiente, disminuir el radio de búsqueda de puntos puede ser la mejor estrategia, ya que evita problemas de estacionariedad, aunque hay que procurar que el radio de búsqueda no sea inferior al rango, ya que no se utilizaría toda la información que proporciona el semivariograma. Otra decisión a tomar es el tipo de interpolación: puntual o por bloques. Mientras que la interpolación puntual estima el valor de la variable en un punto del espacio, en la interpolación por bloques se estima el valor de variable con la media de un área predeterminada que rodea a ese punto. En la mayoría de los casos la interpolación por bloque correlaciona mejor con los valores verdaderos, siendo generalmente más exacta que la interpolación puntual (Isaaks y Srivastava, 1989). [15]

Kriging presenta dos propiedades básicas que son: hacer que la suma de errores tienda cero, y que el cuadrado de las desviaciones sea mínimo. Tiene como objetivo estimar el valor de la variable Z , para un punto x_0 que no ha sido considerado anteriormente, y lo hace realizando una suma ponderada de las muestras de la variable sobre todos los sectores que conforman la zona de estudio de interés, siendo los vecinos más cercanos al punto de interés x_0 , los de mayor peso para la predicción.

El resultado final del Kriging es un mapa con los valores interpolados de la variable. Sin embargo, a diferencia de otras técnicas, la geoestadística permite representar en el espacio (en forma de varianza o desviación estándar) el grado de incertidumbre o error de cada interpolación. Por tanto a cada punto del espacio interpolado se le puede asociar una distribución teórica, lo que además permite la posibilidad de realizar simulaciones probabilísticas, representando el resultado del Kriging como la probabilidad de que la variable alcance un determinado valor.

6.1. MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DEL KRIGING

Existen tres métodos de Kriging para realizar las estimaciones.

- KRIGING SIMPLE

Asume que las medias locales son relativamente constantes e iguales a la media poblacional, la cual es conocida. La media poblacional es usada como un factor en cada estimación local, a lo largo con las muestras en la vecindad local.

- KRIGING ORDINARIO

Es el método más apropiado, para situaciones medioambientales, este método asume que las medias locales, no están necesariamente relacionadas lo más cercanamente a la media poblacional, por lo cual solo usa las muestras en la vecindad local para la estimación.

- KRIGING UNIVERSAL

El kriging universal presupone que hay una tendencia de invalidación en los datos, este solo se debe utilizar si se conoce una tendencia en los datos y se puede dar una justificación científica para describirla.

6.2. ELECCIÓN DEL MÉTODO DE ESTIMACIÓN

Basado en el enfoque del proyecto que se centra en el análisis de variables medioambientales para el estudio de zonas con alta periodicidad de incendios y el apoyo a actividades de agricultura de precisión, se observó que el método de estimación geoestadístico más apropiado es el *Kriging ordinario* ya que este es útil en muestras sin valores atípicos, ni valores muy altos, ni muy bajos y sin estructura espacial. Presupone que el valor de la media constante es desconocido, presuposición que es razonable a la hora de analizar una variable regionalizada y además es el método que viene predeterminado para el estudio medioambiental.

6.2.1. Análisis del KRIGING ordinario. En esta sección se hace un breve resumen en donde se hace un análisis matemático del método de estimación utilizado en este proyecto.

Suponga que se hacen mediciones de la variable de interés Z en los puntos $x_i, i=1,2,\dots,n$, de la región de estudio, es decir se tienen realizaciones de las variables $Z(x_1),\dots,Z(x_n)$, y se desea predecir $Z(x_0)$, en el punto x_0 donde no hubo medición. En esta circunstancia, el método kriging ordinario propone que el valor de la variable puede predecir como una combinación lineal de las n variables aleatorias así:

$$\begin{aligned} Z^*(x_0) &= \lambda_1 Z(x_1) + \lambda_2 Z(x_2) + \lambda_3 Z(x_3) + \lambda_4 Z(x_4) + \lambda_5 Z(x_5) + \dots + \lambda_n Z(x_n) \\ &= \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \end{aligned}$$

En donde λ_i representan los pesos o ponderaciones de los valores originales. Dichos pesos se calculan en función de la distancia entre los puntos muestreados y el punto donde se va a hacer la correspondiente predicción. La suma de los pesos debe ser igual a uno para que la esperanza del predictor sea igual a la esperanza de la variable. Esto último se conoce como el requisito de insesgamiento.

Estadísticamente la propiedad de insesgamiento se expresa a través de:

$$E(Z^*(x_0)) = E(Z(x_0))$$

Asumiendo que el proceso es estacionario de media m (desconocida) y utilizando las propiedades del valor esperado, se demuestra que la suma de las ponderaciones debe ser igual a uno:

$$\begin{aligned} E\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)\right) &= m \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i E(Z(x_i)) &= m \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i m &= m \\ m \sum_{i=1}^n \lambda_i &= m \Rightarrow \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{aligned}$$

Se dice que $Z^*(x_0)$ es el mejor predictor, lineal en este caso, porque los pesos se obtienen de tal manera que minimicen la varianza del error de predicción, es decir que minimicen la expresión:

$$V(Z^*(x_0) - Z(x_0))$$

Esta última es la característica distintiva de los métodos kriging, ya que existen otros métodos de interpolación como el de distancias inversas o el poligonal, que no garantizan varianza mínima de predicción (Samper y Carrera, 1990). La estimación de los pesos se obtienen minimizando $V(Z^*(x_0) - Z(x_0))$ sujeto a

$$\sum_a^n \lambda_a = 1$$

Se tiene que:

$$V(Z^*(x_0) - Z(x_0)) = V(Z^*(x_0) - 2Cov[Z^*(x_0), Z(x_0)] + V[Z(x_0)])$$

Desagregando los componentes de la ecuación anterior se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} V[Z(x_0)] &= V\left[\sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)\right] \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j Cov[Z(x_i), Z(x_j)] \end{aligned}$$

De aquí en adelante se utilizara la siguiente notación:

$$Cov[Z(x_i), Z(x_j)] = C_{ij}$$

y

$$V[Z(x_0)] = \sigma^2$$

De lo anterior:

$$\begin{aligned} Cov[Z^*(x_0), Z(x_0)] &= Cov\left[\sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i), Z(x_0)\right] \\ &= \sum_{i=1}^n \lambda_i Cov[Z(x_i), Z(x_0)] = \sum_{i=0}^n \lambda_i C_{i0} \end{aligned}$$

Entonces reemplazando, se tiene que:

$$V[Z^*(x_0) - Z(x_0)] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j C_{ij} - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i C_{i0} + \sigma^2 (0)$$

Luego se debe minimizar la función anterior sujeta a la restricción $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$.

Este problema de minimización con restricciones se resuelve mediante el método de multiplicadores de Lagrange.

$$\sigma_k^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j C_{ij} - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i C_{i0} + \sigma^2 + 2\mu \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right)$$

Siguiendo el procedimiento acostumbrado para obtener valores extremos de una función, se deriva e iguala a cero, en este caso con respecto a λ_i y μ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\sigma_k^2)}{\partial \lambda_1} &= \frac{\partial \left[(\lambda_1^2 C_{11} + 2\lambda_1 \sum_{j=2}^n \lambda_j C_{1j} + \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j C_{ij}) - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i C_{i0} + \sigma^2 + 2\mu \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right) \right]}{\partial \lambda_1} \\ &= \left(2\lambda_1 C_{11} + 2 \sum_{j=2}^n \lambda_j C_{1j} \right) - 2C_{10} + 2\mu \\ &= 2 \sum_{j=1}^n \lambda_j C_{1j} - 2C_{10} + 2\mu = 0 \Rightarrow \sum_{j=1}^n \lambda_j C_{1j} + \mu = C_{10} \quad (1) \end{aligned}$$

De manera análoga se determinan las variables con respecto a $\lambda_2, \dots, \lambda_n$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\sigma_k^2)}{\partial \lambda_1} &= 2 \sum_{j=1}^n \lambda_j C_{2j} - 2C_{20} + 2\mu = 0 \Rightarrow \sum_{j=1}^n \lambda_j C_{2j} + \mu = C_{20} \quad (2) \\ &\vdots \\ \frac{\partial(\sigma_k^2)}{\partial \lambda_n} &= 2 \sum_{j=1}^n \lambda_j C_{nj} - 2C_{n0} + 2\mu = 0 \Rightarrow \sum_{j=1}^n \lambda_j C_{nj} + \mu = C_{n0} \quad (3) \end{aligned}$$

Por último derivamos con respecto a μ :

$$\frac{\partial(\sigma_k^2)}{\partial \mu} = 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i - 2 = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (4)$$

De (1),(2),(3),(4) resulta un sistema de $(n + 1)$ ecuaciones con $(n + 1)$ incógnitas, que matricialmente puede ser escrito como :

$$\begin{pmatrix} C_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & C_{1n} & 1 \\ \cdot & \cdot & & & \cdot & \cdot \\ \cdot & & \cdot & & \cdot & \cdot \\ \cdot & & & \cdot & \cdot & \cdot \\ C_{n1} & \cdot & \cdot & \cdot & C_{nn} & 1 \\ 1 & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \lambda_n \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{10} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ C_{n0} \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$C_{ij} \bullet \lambda = C_{i0}$$

Por lo tanto los pesos que minimizan el error de predicción se determinan mediante la función de covarianza a través de:

$$\lambda = C_{ij}^{-1} \bullet C_{i0}$$

Encontrando los pesos se calcula la predicción en el punto x_0 . De forma análoga se procede para cada punto donde se quiera hacer predicción. La varianza de predicción de Kriging ordinario será por lo tanto:

$$\sigma_k^2 = \sigma^2 - \sum_{i=1}^n \lambda_i C_{i0} - \mu \quad (5)$$

6.2.2. Representación de predicciones. Una vez se ha hecho la predicción en un conjunto de puntos diferentes de las muestras vía kriging, se debe elaborar un mapa que dé una representación global del comportamiento de la variable de interés en la zona estudiada. Los más empleados son los mapas de contornos, los mapas de residuos y los gráficos tridimensionales. En el caso de los mapas de contornos, en primer lugar se divide el área de estudio en un enmallado y se hace la predicción en cada uno de los nodos de éste mismo.

Posteriormente se unen los valores predichos con igual valor, generando así las líneas de contorno (isolíneas de distribución). Este gráfico permite identificar la magnitud de la variable en toda el área de estudio.

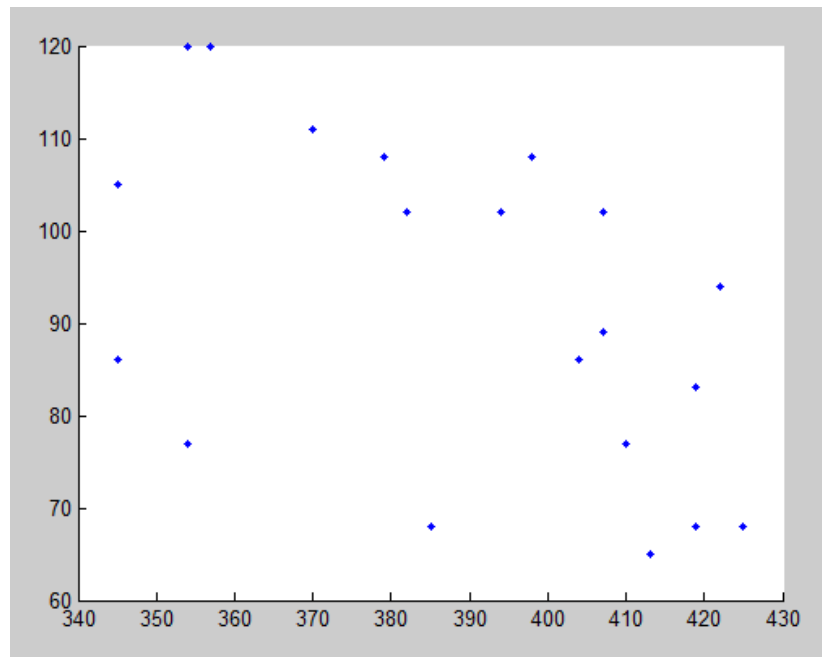
Es conveniente acompañar el mapa de interpolaciones de la variable con los correspondientes mapas de isolíneas de los errores y de las varianzas de predicción (posiblemente estimados a través de métodos matemáticos), con el propósito de identificar zonas de mayor incertidumbre respecto a las predicciones.

6.3. IMPLEMENTACION DE ALGORITMO DE ESTIMACION

Para la implementación del algoritmo de estimación se analizaron las medidas de las variables seleccionadas temperatura y humedad, obtenidas en el terreno de estudio, las cuales fueron tomadas aleatoriamente para determinar su comportamiento en dicho terreno y obtener la estimación más óptima o precisa en los puntos donde no se realizaron muestras. Para esto el algoritmo de estimación Kriging se implementó en el toolbox de Matlab mGstat, para el análisis geoestadístico de las variables.

En la figura 39 se observa la distribución de las muestras identificadas por los puntos azules dentro del terreno de estudio, que representan los nodos de la red de sensores monitoreando las variables.

Figura 38 Distribución de muestras



En el cuadro 10 se muestra una tabla con los valores de las observaciones para cada nodo.

Cuadro 10. Ubicación de los nodos y sus respectivas temperaturas

X(m)	Y(m)	T°C
385	68	32,2
354	77	29,4
345	86	30,1
345	105	30
357	120	37
354	120	37,1
370	111	37
379	108	37,4
382	102	40
394	102	35,3
398	108	34
422	94	27,6
407	102	29,8
407	89	31,1
404	86	30,6
419	83	30
410	77	30,9
419	68	31,6
425	68	31,3
413	65	32,3

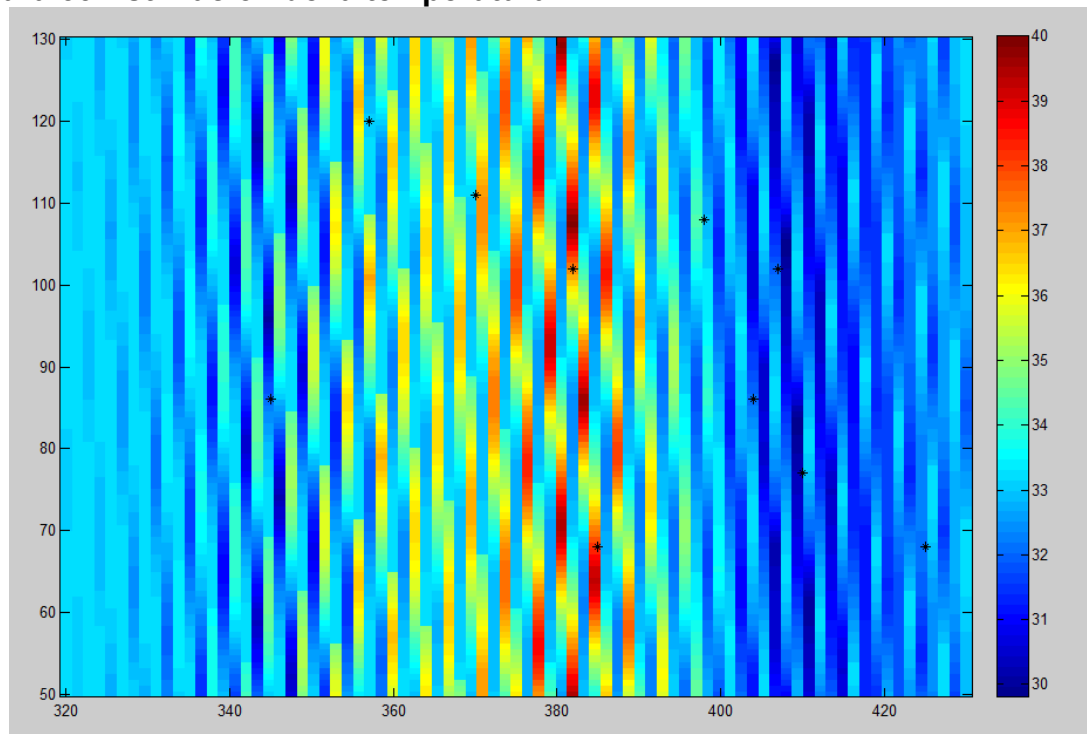
Teniendo las observaciones de la temperatura para cada nodo, se procede a estimar los valores de temperatura en donde no hay nodos que realicen mediciones. Para corroborar el funcionamiento del algoritmo de estimación se insertaron algunas de las mediciones de la tabla 10 y se procedió realizar la estimación con los 11 valores intermedios de dichas mediciones. En la tabla 11 se muestra una tabla con los valores que se tomaron en cuenta de la tabla 10 para realizar la estimación.

Cuadro 11. Valores utilizados en la estimación

X (m)	Y (m)	T(°C)
385	68	32,2
345	86	30,1
357	120	37
370	111	37
382	102	40
398	108	34
407	102	29,8
404	86	30,6
410	77	30,9
425	68	31,3

La representación de la estimación de la temperatura se muestra en la figura 40 donde se ubican las muestras de la tabla 10 en sus coordenadas xy con sus correspondientes valores de temperatura representados en la barra de contornos, donde se muestra el tono del color para cada temperatura estimada en el terreno.

Figura 39 Estimación de la temperatura



Por medio de la estimación de la variable temperatura en la figura 40 se representaron todas las posibles temperaturas por metro cuadrado del área de estudio, y se pudo contrastar con las temperaturas intermedias que no se usaron para la estimación en el cuadro 11, mostrando un valor aproximado al valor real medido inicialmente.

Por ejemplo, la estimación de la temperatura medida en el punto (379,108) respecto a la temperatura muestreada en el mismo punto fue:
Temperatura en (379,108):

- *Temperatura estimada* → 38.27 °C (figura 43)
- *Temperatura muestreada* → 37.40 °C (tabla 9)
- *Calculo de error entre medidas*

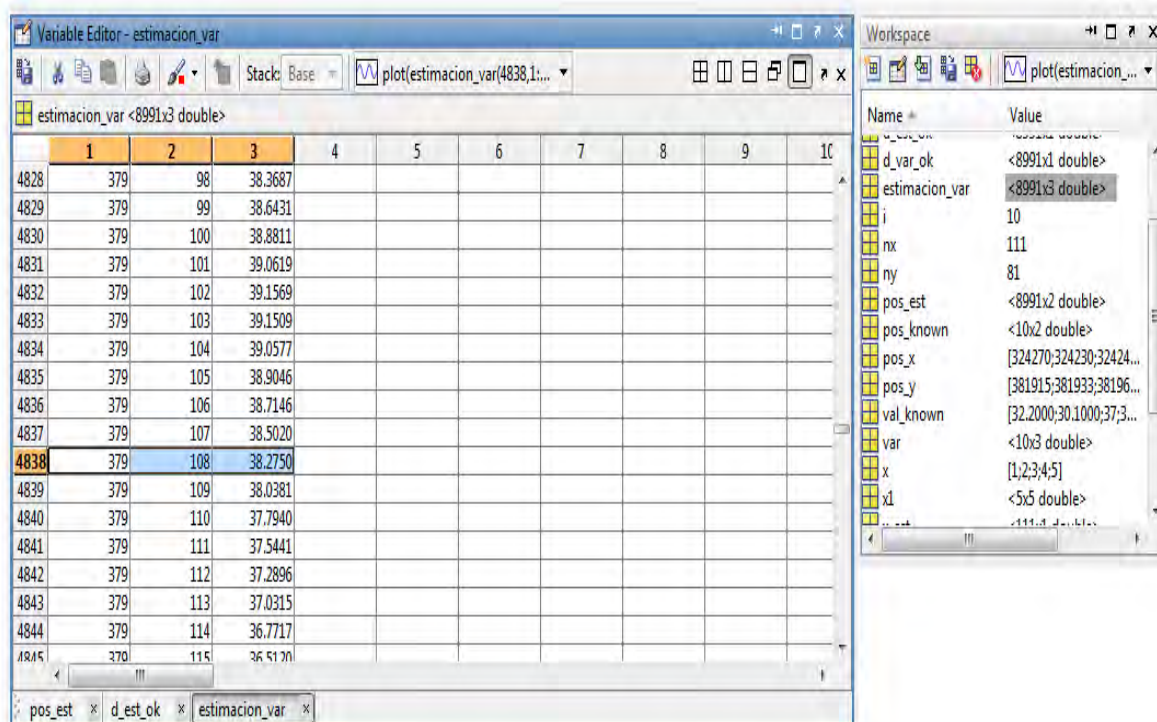
$\Delta t = |t - t_0|$, donde t es la temperatura estimada y t_0 es la temperatura muestreada, de forma que

$\Delta t = |t - t_0| = |38.27^\circ C - 37.40^\circ C| = 0.87^\circ C$, por lo que el error de la predicción es:

$$\varepsilon = \frac{\Delta t}{t_0} * 100\% = \frac{0.87^\circ C}{37.40^\circ C} * 100\% = 2.3\%$$

De esta forma se considera un error muy mínimo considerando que la estimación se realizó en un zona cercana a las muestras.

Figura 40 Visualización de temperaturas estimadas – Workspace MATLAB



De la misma forma se obtuvieron las temperaturas estimadas para la comparación con las 10 temperaturas intermedias muestreadas que no se incluyeron en la estimación. En la tabla 12 se presenta una aproximación en los valores de temperatura respecto a los valores muestreados en el cuadro 9.

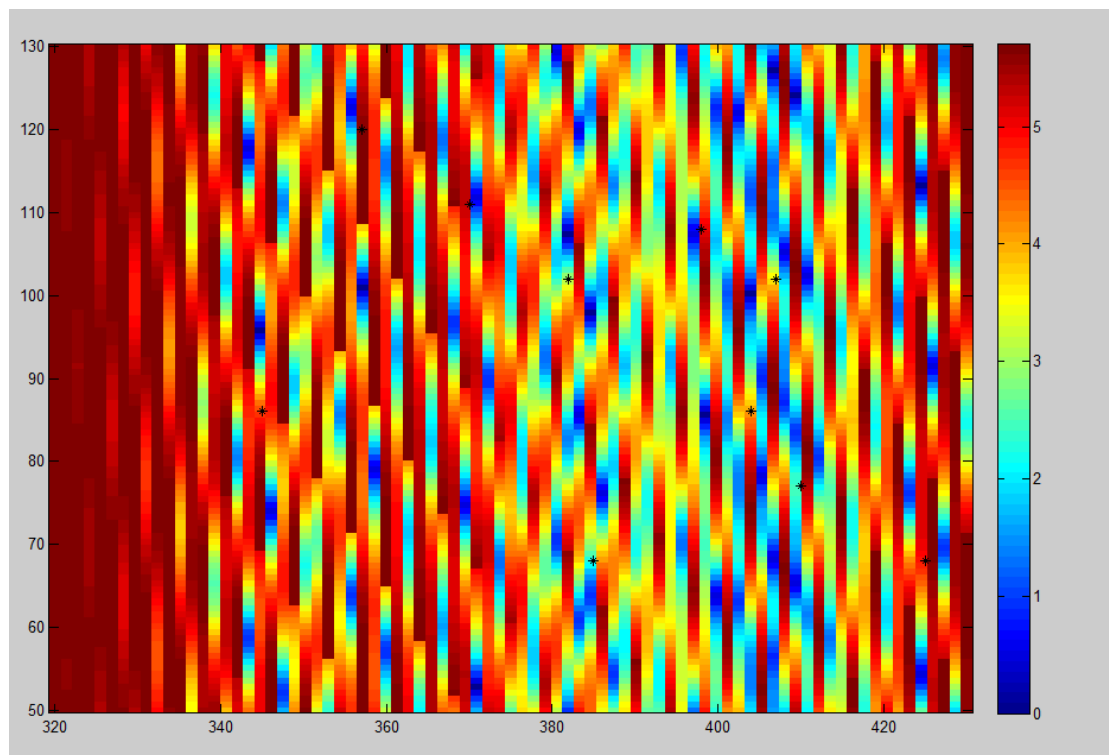
Cuadro 12. Temperaturas estimadas

X(m)	Y(m)	T(°C)
354	77	31,9632831
345	105	33,2953483
354	120	36,4007795
379	108	38,275018
394	102	35,0761219
422	94	31,9093974
407	89	30,4546372
419	83	31,4974036
419	68	31,4943275
413	65	31,9240029

Los valores que presentan mayor error en la comparación son aquellos donde no se realizaron muestras en su cercanía, o los datos que se usaron en la estimación no eran cercanos al punto de estimación, por consiguiente los de menor error tuvieron mayores muestras en su cercanía.

En la figura 42 se muestra la varianza obtenida la cual indica la diferencia promedio que hay entre cada uno de los valores estimados respecto a su punto central. Esto es de gran ayuda puesto que permite identificar los puntos donde hay más o menos variación de la temperatura y de esta forma determinar la ubicación de un nodo en aquellas posiciones donde los cambios de la variable observada sean muy críticos.²⁴

Figura 41 Varianza de los datos estimados



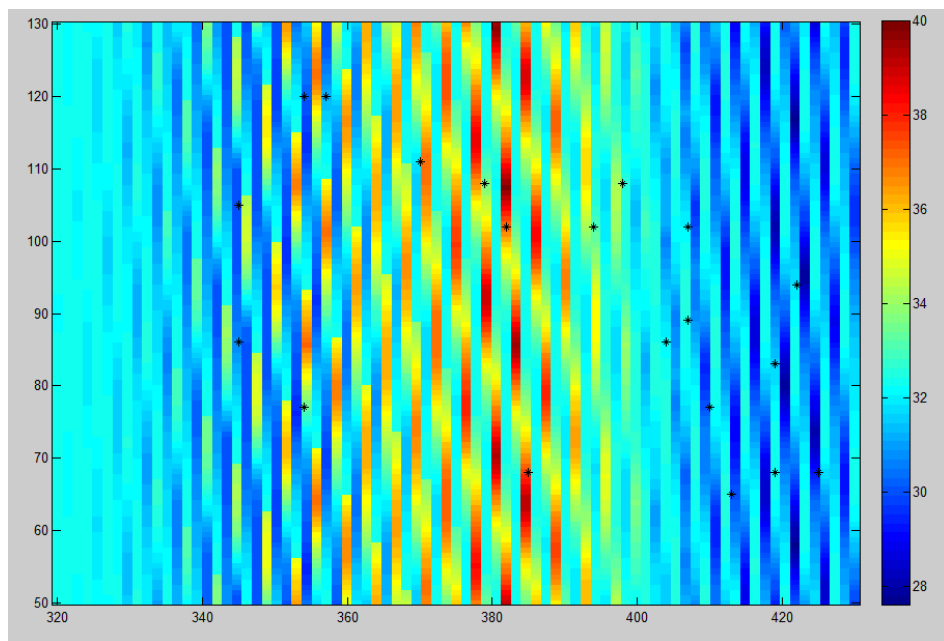
La varianza obtenida muestra que según la barra de contorno el error obtenido en la estimación es mayor a 5°C , esto en las esquinas del área donde se llevó a cabo la estimación, que es donde mayormente se concentra la variabilidad de la variable. En los puntos intermedios se observa que la variación obtenida supera los 5°C , algo muy importante teniendo en cuenta que el rango de

²⁴ PEÑA PARRA, M. diseño e implementación de una red de sensores inalámbrica para el monitoreo de temperatura y humedad durante el cultivo del champiñón. cali-colombia: universidad autónoma de occidente.2011-

temperatura dentro del área son grandes, lo cual contribuye a la generación de incendios en esas zonas y en el caso de los cultivos la generación de estrés hídrico que detiene el crecimiento de la planta por falta de agua en las hojas.

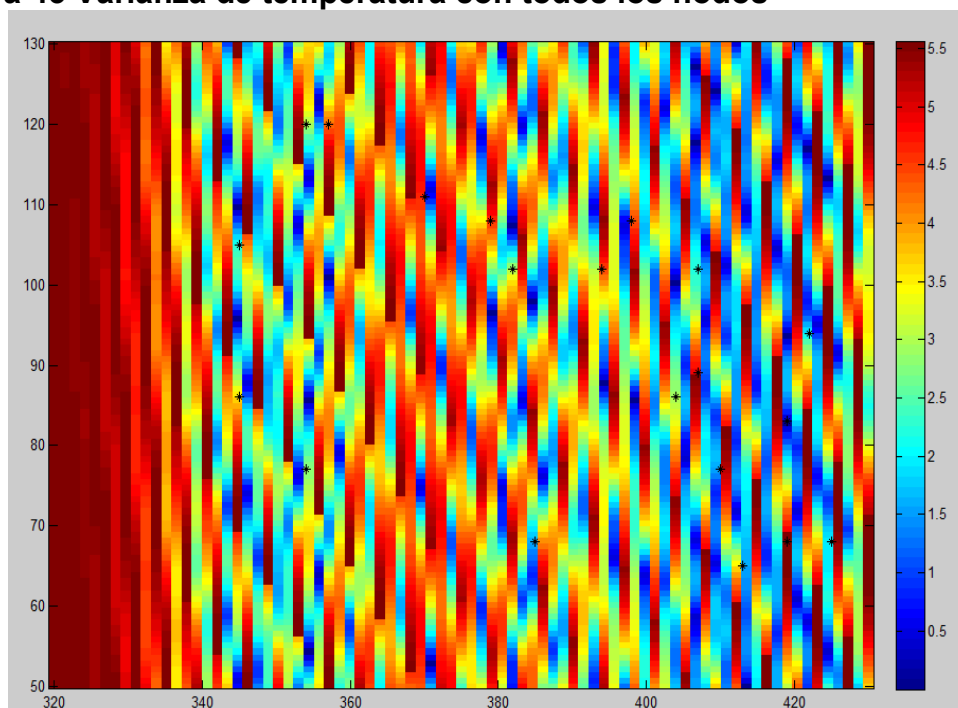
En las figuras 43 y 44 se estimó la variable temperatura y su varianza en el área de estudio, con todos los valores de los nodos de la tabla 11, lo que generó una mayor precisión en la estimación de nuevos valores en diferentes posiciones y una disminución en el error de la variable.

Figura 42 Estimación de temperatura con todos nodos



La estimación de la figura 43 muestra un mayor suavizado en los colores de las temperaturas respecto a la estimación de la figura 40, ya que al haber más mediciones hay menos cambios bruscos de una temperatura respecto a otra y se mejora la precisión.

Figura 43 Varianza de temperatura con todos los nodos



Posteriormente en la figura 44 se observa en la esquina inferior derecha una varianza mínima de no mayor a 4°C respecto a los 5°C de la varianza de la figura 42, indicando un muestreo mayor en las cercanías de esta zona, permitiendo predicciones más óptimas en ese lugar.

7. DISEÑO DE LA BASE DE DATOS E INTERFACE WEB

En este capítulo se presenta el desarrollo de la base de datos y la página web para la visualización, manejo y análisis de los datos recolectados por la red. Se exponen los criterios de selección de los modelos y tipos de la base de datos, el lenguaje utilizado para el desarrollo de la base de datos y la página web, y sus respectivas validaciones.

7.1.MODELOS DE BASES DE DATOS

Un modelo de base de datos es el fundamento teórico que avala y determina la forma en que la información contenida en la base va a ser guardada, organizada y operada. Teniendo estos modelos reconocemos la conformación de la base.

Existe un gran número de modelos de bases de datos y entre los más reconocidos están:

- El modelo jerárquico: en el cual los datos están organizados en una distribución parecida a la de un árbol. Este modelo utiliza estructuras padre/hijo en las cuales cada padre puede tener muchos hijos pero cada hijo solo puede tener un padre.
- El modelo de red: es ligeramente diferente al modelo jerárquico y la diferencia radica en que este modelo si permite que dentro de la relación padre/hijo cada hijo pueda tener varios padres generando un nuevo concepto llamado nodo. [45]
- El modelo relacional: en este modelo todos los datos son almacenados en relaciones, y como cada relación es un conjunto de datos, el orden en el que éstos se almacenen no tiene relevancia (a diferencia de otros modelos como el jerárquico y el de red). Esto tiene la considerable ventaja de que es más fácil de entender y de utilizar por un usuario no experto.[41]. Por lo anterior y dadas las condiciones planteadas en el caso que se aborda en este trabajo, el modelo relacional es el que más se acomoda a los requisitos del proyecto.

7.2.TIPOS DE BASES DE DATOS

Al igual que hay varios modelos de bases de datos que se ajustan a diferentes requerimientos, lo mismo sucede con los tipos de bases que ayudan a sintetizar la solución. Existen 2 tipos de bases de datos:

- Las bases estáticas son bases de datos de sólo lectura las cuales almacenan datos durante largos periodos de tiempo, los cuales se utilizan posteriormente para estudiar el comportamiento del sistema generador de la información.
- El segundo tipo son las bases dinámicas, las cuales permiten que la información almacenada sea modificada posteriormente, realizando operaciones como actualización, borrado y adición de datos, además de las operaciones fundamentales de consulta. Por las razones expuestas las bases de datos dinámicas se ajustan más a los requisitos del proyecto.²⁵

7.3. Diseño de la base de datos

Al realizarse una base de datos se hace importante hacer un diagrama de entidad relación que ayude a ilustrar la estructura de la base de datos respecto a los campos que constituyen la tabla de la base.

Figura 44 Diagrama entidad - Relación



El sumidero está comprendido por un PC y un nodo coordinador de la red, la estructura de la red se detalla en el capítulo 3. El PC contendrá la base de datos de la red y el algoritmo de estimación el cual utiliza los datos almacenados en la base. El nodo coordinador estará conectado al PC por medio del puerto serial del mismo y por este medio se obtendrá toda la información a almacenarse.

Dicho nodo coordinador estará conectado inalámbricamente con el resto de nodos de la red. El coordinador es un dispositivo igual a los que comprenden

²⁵ WIKIPEDIA. (s.f.).La enciclopedia virtual[en línea]Florida[consultado abril de 2012, de Base de datos. Dispon ible en internet:: http://es.wikipedia.org/wiki/Base_de_datos

la red con la diferencia que en la red los diferentes nodos constan de unos perfiles los cuales muestran que papel desempeñan en la red siendo el nodo coordinador el más importante ya que controla la transmisión de datos y acciones que se realicen.

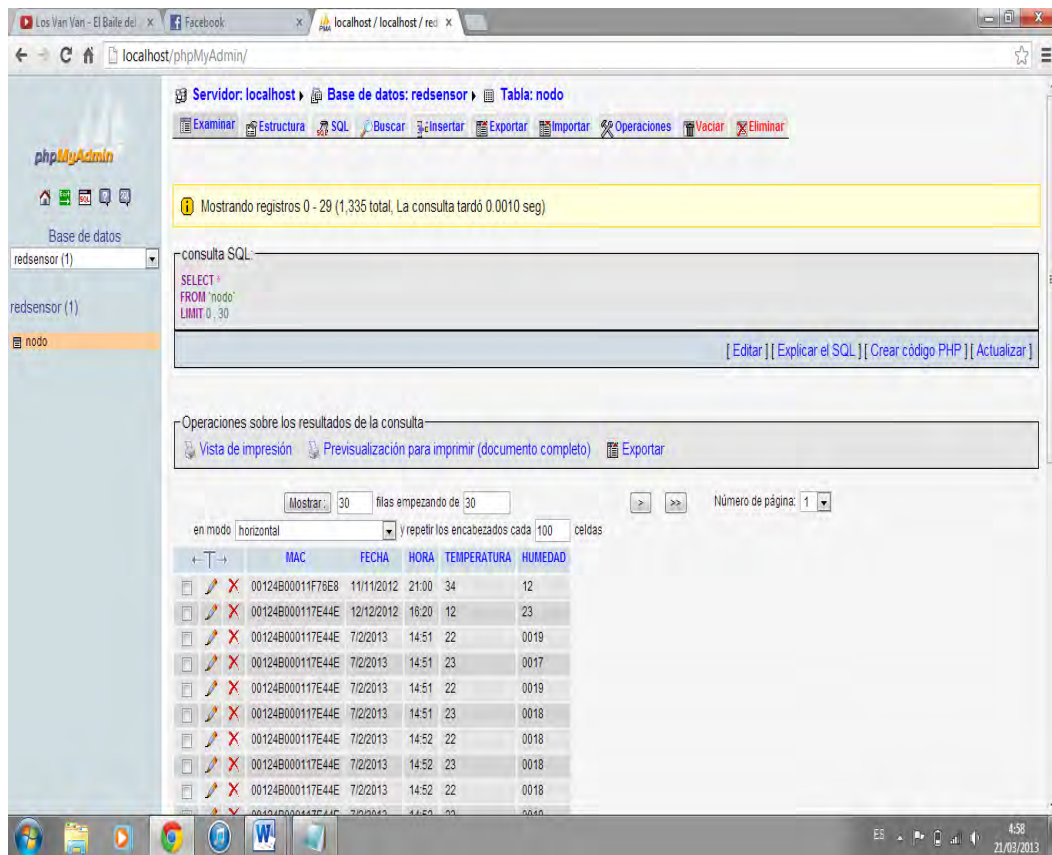
Esta base de datos contiene una tabla llamada nodo la cual está comprendida por 5 campos los cuales son la dirección MAC del nodo, que tiene entre las características la asociación y la disociación, reconocimientos de entrega de trama, mecanismos de acceso al canal, validación de trama, garantía del manejo de las ranuras de tiempo, y manejo de guías haciendo que esta sea única por cada dispositivo permitiendo utilizarla como identificación; FECHA y HORA, los cuales se utilizan como criterios de búsqueda específica; las mediciones de TEMPERATURA Y HUMEDAD; BATERIA, el cual indica el porcentaje de energía con el que cuenta la batería del respectivo nodo.

Figura 45 Interfaz técnica para consultas en Java (Netbeans)

The screenshot shows a Java application window titled "RED SENSOR DATABASE". It features a tabbed interface with "Administración" and "Búsqueda" tabs. The "Búsqueda" tab is active, displaying search criteria fields for MAC, FECHA, HORA, TEMPERATURA, and HUMEDAD. Below these fields are buttons for "Buscar", "Exportar Consulta", and "Exportar Todo". At the bottom of the window, there are buttons for "Eliminar", "Limpiar", "Terreno", and "Salir".

En la figura 46 podemos ver la interfaz de usuario para búsquedas realizada en Netbeans, en la cual podemos filtrar las búsquedas según los campos establecidos en la base.

Figura 46 Base de datos



Al establecer la base de datos con nuestro gestor podemos ver como se ingresan dichos datos a la base. Ver figura 47.

7.4. DISEÑO PÁGINA WEB

Luego de tener en pleno funcionamiento la base de datos en conjunto con la red, se decidió que dichos datos almacenados en la base deberían tener otra forma de visualizarse dado que todos los usuarios de la información no van a ser usuarios especializados en el tema sino gente del común que hace uso de los datos que recoge la red para estudios, análisis u otra serie de actividades. Para este hecho se decidió hacer una página web que actualizara los mismos datos almacenados en la base permitiendo que cualquier persona que tenga acceso a un computador pueda acceder a un browser y acceder a los datos. Dicha página web fue diseñada en php y haciendo uso de la compatibilidad de la que hace goce Mysql, se hizo la conexión de la página con la base permitiendo que la información pueda ser actualizada constantemente.

La forma natural de comprobar el funcionamiento de la página web fue por medio del uso de un servidor, el cual provea las direcciones públicas que permiten el acceso a internet, pero dada la imposibilidad de trabajar con un servidor de estas características se simuló la manera como un usuario accedería a la información de la base creando una LAN.

Para esto se creó una red LAN comprendida por el computador que funciona como estación base y contiene el servidor web y la base de datos, la red integra un switch el cual comunica la estación base con los computadores de usuario los cuales también hacen parte de la red.

Para constituir la red se procedió a la configuración de la estación base, la cual quedó con la dirección IP número 192.168.4.15, y en los computadores de usuario también se procedió a realizar la misma configuración otorgándoles las direcciones 192.168.4.14 y 192.168.4.16 respectivamente, ya que el hecho es crear una red LAN a cada computador se le dio la misma puerta de enlace número 192.168.4.254 para que todos queden configurados en la misma red y desde los usuarios se lograra visualizar la página HTML creada para las consultas de la base.

Figura 47 Configuración del equipo estación base (servidor web)

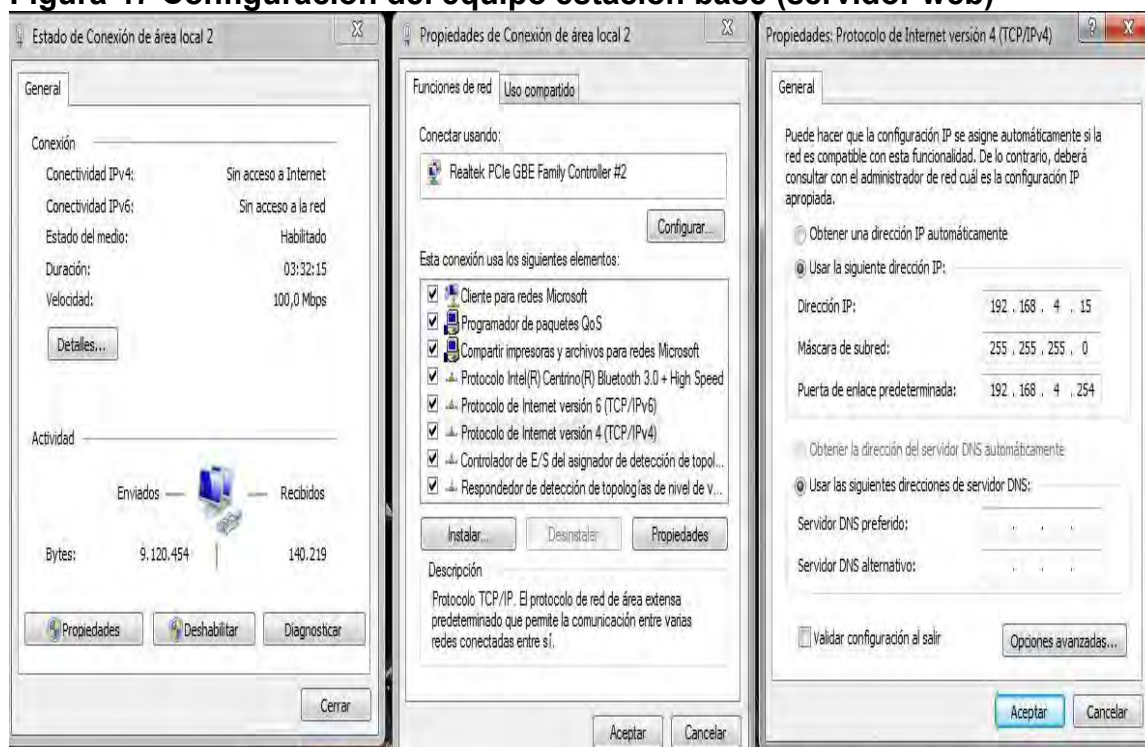


Figura 48 Configuración del equipo de usuario 1 conectado a la red LAN

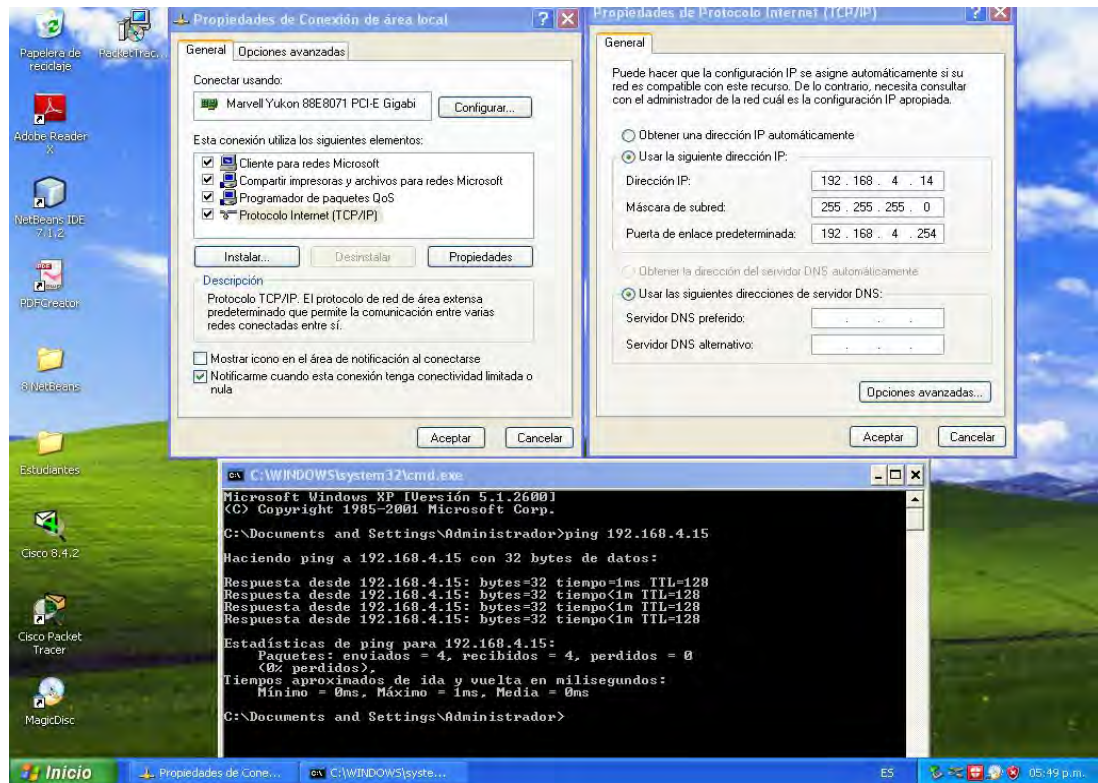
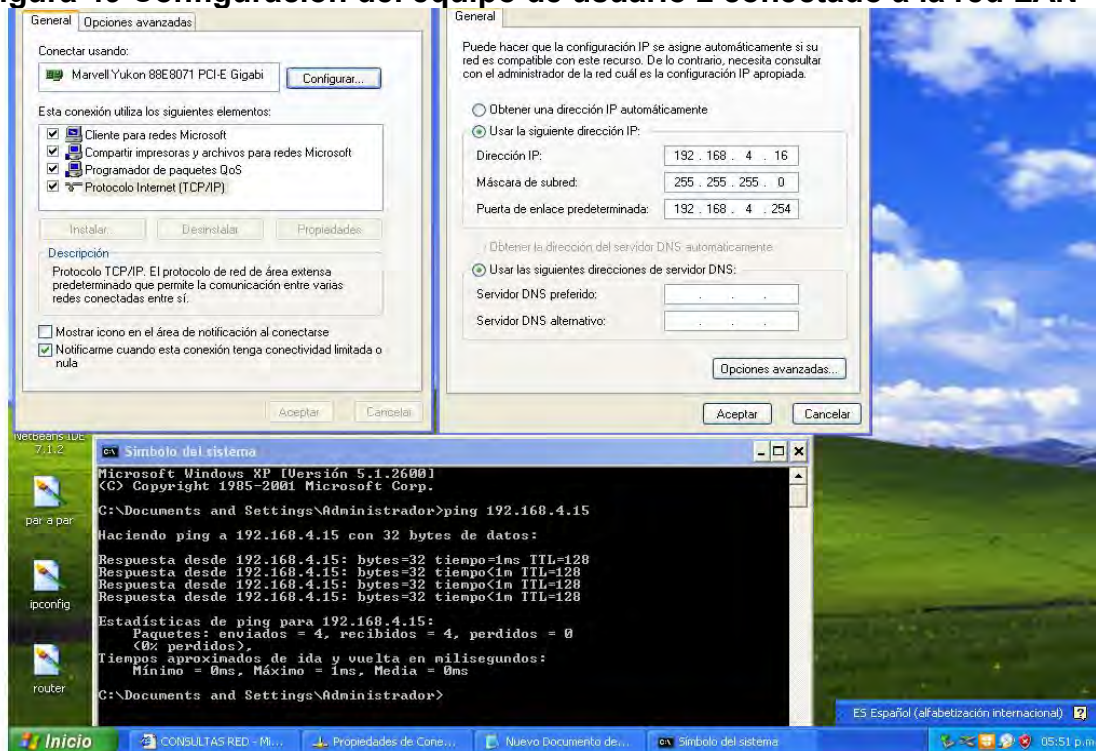
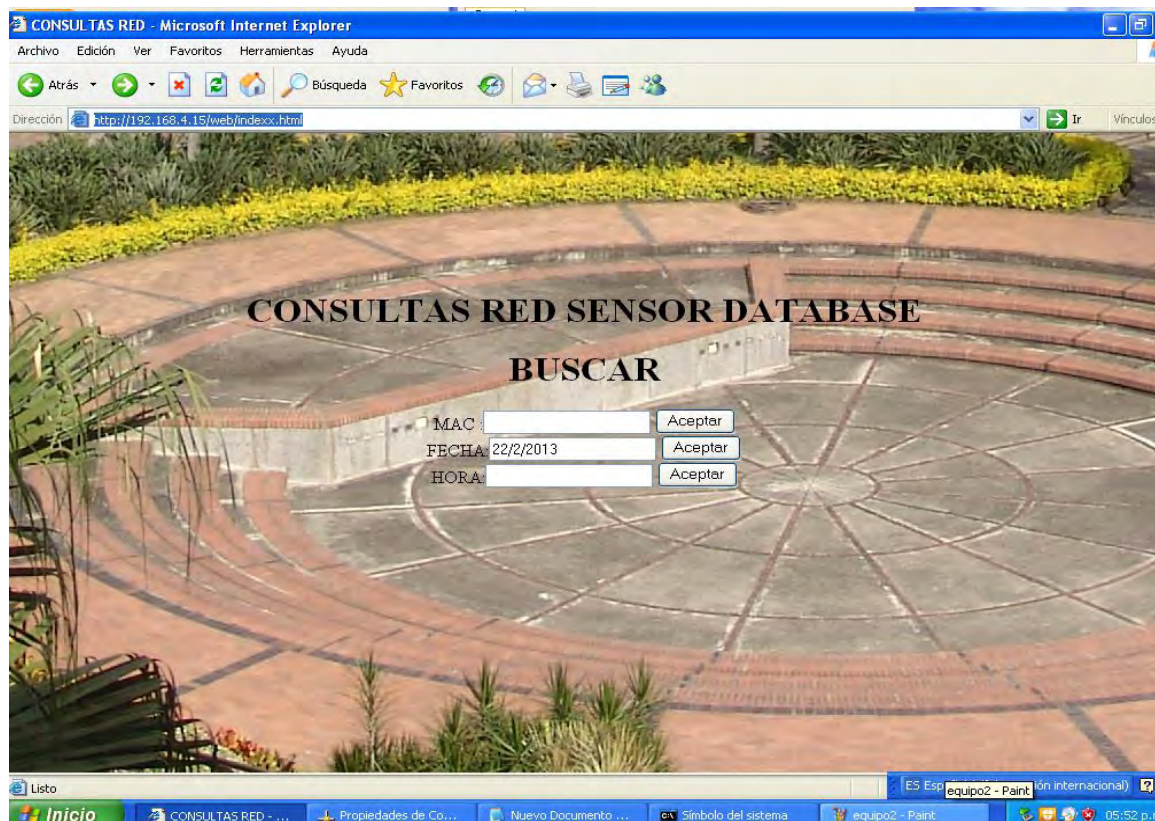


Figura 49 Configuración del equipo de usuario 2 conectado a la red LAN




Una vez configurados todos los equipos de la red se proceden a validar la correcta conexión, para esto se hace ping entre todos los equipos que constituyen la red LAN. Una vez perfectamente establecida la red, desde los equipos de usuario se coloca la dirección donde está ubicada la página, que para este caso sería <http://192.168.4.15/web/indexx.html>.

Figura 50 Comprobación del funcionamiento de la página web desde otro computador para consultas



Luego de realizarse una consulta por ejemplo por la fecha el resultado es:

Figura 51 Resultados de la consulta desde el computador conectado a la red LAN con el computador servidor o estación base



RESULTADOS DE LA CONSULTA

MAC	FECHA	HORA	TEMPERATURA	HUMEDAD
00124B00011F69C4	22/2/2013	16:49	25	47
00124B000117E44E	22/2/2013	16:49	26	106
00124B00011F69C4	22/2/2013	16:49	25	47
00124B000117E44E	22/2/2013	16:49	26	107
00124B00011F6F53	22/2/2013	16:49	25	115
00124B00011F6F53	22/2/2013	16:49	26	114
00124B00011F69C4	22/2/2013	16:49	25	46
00124B00011F6F53	22/2/2013	16:49	25	115
00124B00011F69C4	22/2/2013	16:49	25	47
00124B000117E44E	22/2/2013	16:49	27	108
00124B00011F69C4	22/2/2013	16:50	25	46
00124B000117E44E	22/2/2013	16:50	26	108
00124B00011F6F53	22/2/2013	16:50	26	115
00124B000117E44E	22/2/2013	16:50	26	105
00124B00011F69C4	22/2/2013	16:50	25	46
00124B000117E44E	22/2/2013	16:50	26	107
00124B00011F69C4	22/2/2013	16:50	25	47
00124B000117E44E	22/2/2013	16:50	26	108

8. CASO DE ESTUDIO

Para la realización del caso de estudio se contó con 5 nodos de Texas Instrumens, un termómetro digital, un decámetro y un par de PC, la prueba se realizó en el “Ágora” de la universidad, más exactamente a un costado de la rampa izquierda de la universidad, previo al montaje de la red se calculó la distancia a la cual los nodos podían comunicarse sin y con obstáculos en la línea de vista.

Cuadro 13. Distancias de comunicación entre módulos (samrtrf05EB-CC2530)

Distancia	Obstáculo	Línea de vista	Suelo	Aire	Coord-End	Coord-Router
14mts-60cm	X		X		X	
20mts-9cm		X		X	X	
30mts-6cm		X		X		X
50mts-6cm		X	X		X	

En la figura 53 se puede observar la herramienta de recolección de datos o base de datos que se encuentra implementada en un PC (estación base), la cual recibe y almacena la información de datos transmitidos vía serial por el coordinador, que a su vez este recibe los datos transmitidos inalámbricamente por los diferentes nodos que conforma la red, esta base de datos a su vez crea un historial con la información de los datos medidos durante diferentes periodos de tiempo como son: días, semanas, meses, para después enviarlos a una aplicación web para su posterior visualización en internet.

Figura 52 Estación Base y Nodo Coordinador



En esta implementación de la red de sensores se utilizó un dispositivo router como se observa en la figura 54, para la retransmisión de la información proveniente de dispositivos que se encontraban fuera del rango de cobertura del coordinador de la red, por lo que se necesitó un dispositivo para el enrutamiento de las tramas de información a su destino. Este dispositivo router se utilizó para encaminar los datos de tres dispositivos finales distribuidos alrededor de la zona monitoreada con el coordinador, para conformar una estructura de comunicación fuente-destino de los datos sensados.

Figura 53 Nodo router



En la figura 55 se presenta uno de los tres dispositivos finales ubicados en una zona específica del área de monitoreo el cual se encuentra unido a la red por medio del dispositivo router que retransmite su información al nodo coordinador ubicado en la estación base. De igual forma se puede comprobar la confiabilidad de los datos medidos por el sensor de temperatura del microcontrolador, en la comparación realizada entre los datos del nodo y termómetro digital, donde se observa una precisión confiable para el análisis y estudio medioambiental de la zona monitoreada.

Figura 54 Dispositivo final calibrado



En el caso completo se procedió a establecer la comunicación entre los nodos, para esto se programó como se mencionó anteriormente un nodo como coordinador, uno como router y tres como dispositivos finales, donde estableció la red y se observó la llegada de información a la base de datos correctamente, y se comprobó como la aplicación web actualizaba correctamente la información que se iba almacenando en la base de datos. Para las mediciones con los dispositivos finales se utilizó el sensor interno que trae el microcontrolador cc2530, el cual es un sensor para la medición de su temperatura interna y configurable para la medición de temperatura ambiental, así que se procedió a medir con el termómetro digital la temperatura ambiente, para calibrar el sensor y así usar este para generar la variable temperatura a almacenar.

De la forma como se mencionó en el capítulo del diseño de la red, se simuló un sistema de control ON/OFF en el coordinador de red para la temperatura y la generación de acciones a los nodos con los actuadores, donde estos en este caso serían diodos led en simulación de electroválvulas para el regado de la zona de monitoreo.

En las figura 56 se puede mostrar la comunicación realizada entre el dispositivo final y el coordinador del valor del voltaje del potenciómetro (mV) mostrado en

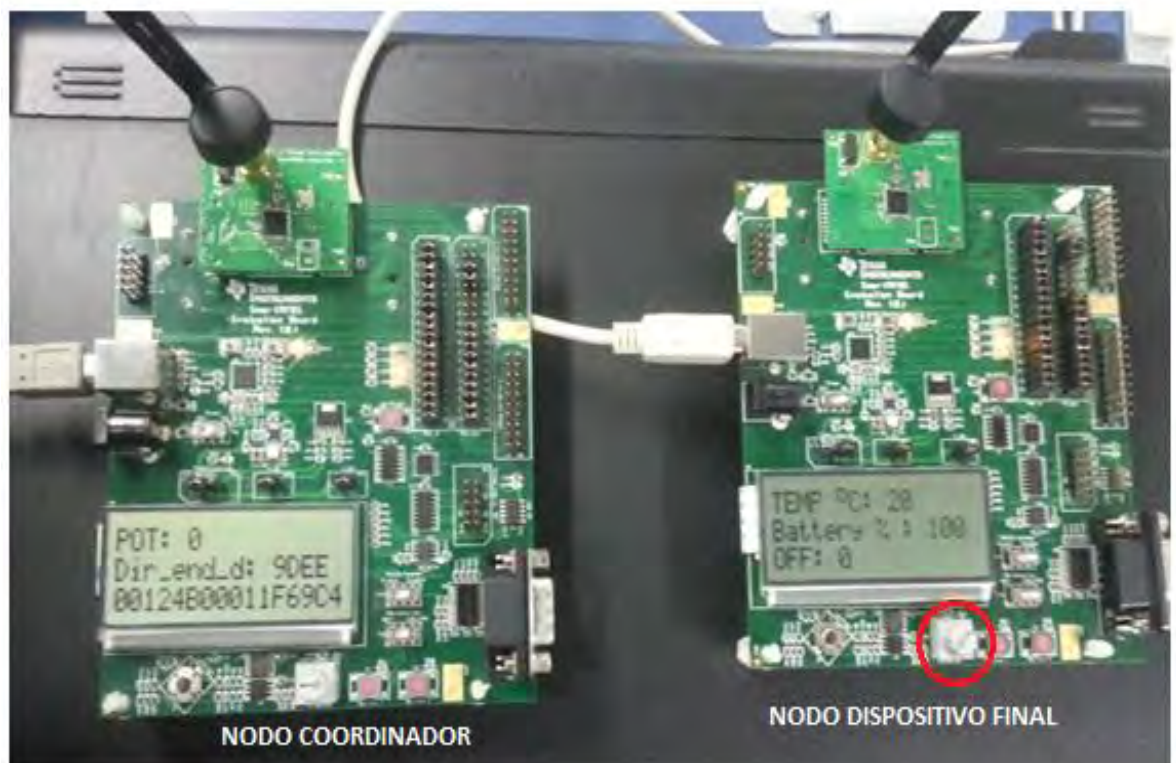
el círculo rojo, este simulara el valor de la temperatura ambiente la cual será enviada inalámbricamente y analizada en el coordinador por el control implementado (ON/OFF), para ejecutar la acción correspondiente basado en los datos de este potenciómetro.

El control implementado es:

Para voltajes del potenciómetro menores a 100mV el led permanece apagado, y para voltajes mayores a 100mV el led se enciende.

En la figura 56 se muestra el potenciómetro del dispositivo final en cero y su valor mostrado en el coordinador en POT: 0, por lo que no hay acción de control.

Figura 55 Comunicación de valor de potenciómetro del dispositivo final a coordinador



En la figura 57 se muestra una variación de del potenciómetro y su valor mostrado en POT: 26, por lo que no hay acción de control aun ya que $26\text{mV} < 100\text{mV}$.

Figura 56 Variación del valor del potenciómetro



Por último se puede observar la acción de control genera por el coordinador al dispositivo final aumentando el valor del voltaje del potenciómetro a 105mV, mostrado en POT: 105, ya que $105\text{mV} > 100\text{mV}$.

Figura 57 Acción de control generada



La acción de control se puede observar en el encendió del diodo led en el dispositivo final y en la pantalla LCD en ON: 1, lo que indica la acción de control ejecutada y para una implementación real indicaría la activación de la electroválvula para el regado. Ver Figura 58.

7.1 ESTIMACIÓN DE VARIABLES POR KRIGEAJE EN CASO DE ESTUDIO.

Debido a que fue necesario realizar un segundo diseño del nodo con características similares al del primer diseño, también fue necesario implementar un caso de estudio respectivo. Para lo que se escogió un área ejemplo a monitorizar y validar el correcto funcionamiento de la red teniendo en cuenta que se deben analizar los mismos parámetros que en el diseño uno, los cuales son el correcto funcionamiento del nodo, correcto funcionamiento de la red, correcta comunicación del nodo coordinador con el computador base por medio de la comunicación serial y posteriormente el almacenamiento de los datos en la red.

En la figura 59 se enseña el área a monitorizar, con los nodos xbee, seleccionada dentro de la universidad, la cual fue cubierta por 12 nodos sensores distribuidos en la zona en una configuración de cuadrilla distanciando uno del otro cada 20 metros como se ve en las figuras 62.

Figura 58 Área a monitorear



Las figuras 60 y 61 fueron generadas con la herramienta google earth y en estas se muestran las coordenadas en las que están ubicados los nodos en el área establecida, datos que posteriormente se necesitaran para realizar el algoritmo de estimación de la red.

Figura 59 Ubicación de los nodos.



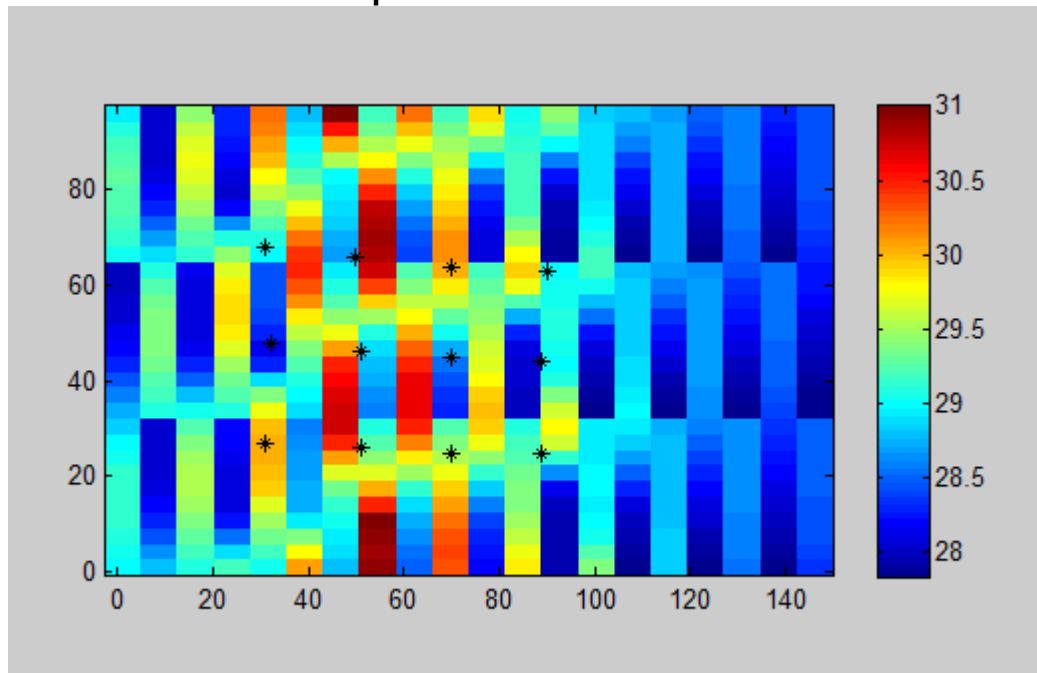
Figura 60 Ubicación de los nodos aumentada.



Para establecer la estimación de las variables medidas por la red de sensores en el monitoreo de la zona del Agora de la universidad autónoma, se implementó el algoritmo de estimación kriging mencionado en el capítulo 5, para determinar el valor de las variables en zonas donde no hubo medidas, y esto se hizo por medio de la recopilación de medidas de dichas variables almacenadas en la base de datos, las cuales se obtuvieron de la transmisión del sensado de cada nodo de la red al coordinador y de este a la base de datos, la cual al final genera un archivo .txt con todos los datos almacenados, los cuales son cargados al algoritmo de estimación implementado en matlab, en el cual se han predefinido las coordenadas de la ubicación de cada nodo.

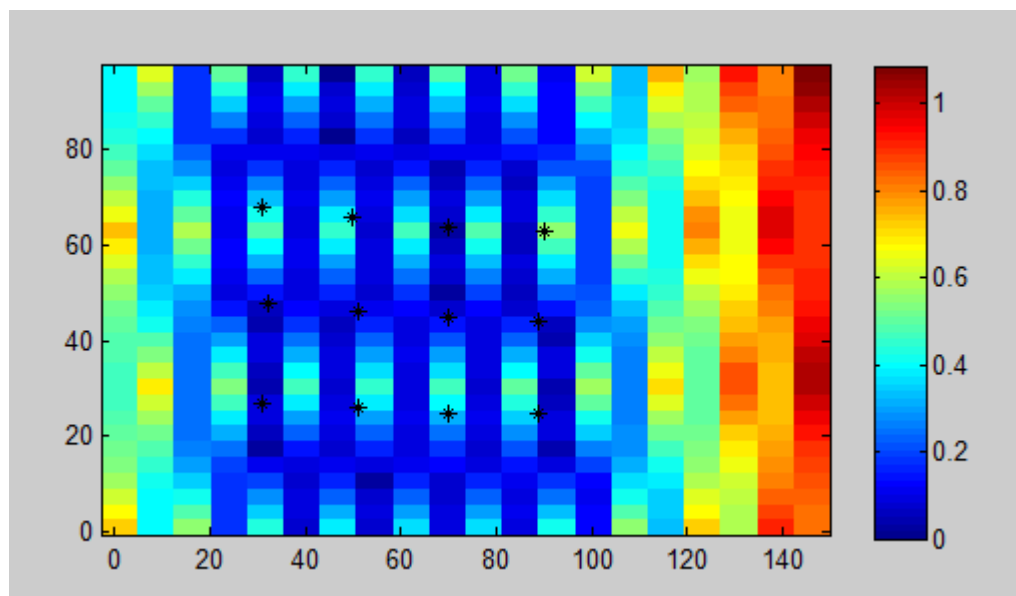
Los resultados de estimación y variabilidad de las temperatura obtenidas por el algoritmo de estimación se muestran en las figuras 62 y 63, donde se muestran las posiciones de cada nodo en sus coordenadas xy y su correspondiente valor de temperatura representado en la barra de contornos, la cual muestra el tono de color para cada temperatura.

Figura 61 Estimación de temperaturas



En la figura 62 se puede observar la distribución de los nodos en forma de cuadrilla en el área de monitoreo de universidad autónoma, en la cual se presentan las diferentes temperaturas sensadas por los nodos y a sus alrededores las estimaciones de dicha variable que se muestran en un tono de color correspondiente a la barra de colores que se muestra a un lado de la imagen.

Figura 62 Variograma de las temperaturas



Para determinar el variograma de la temperatura se obtuvo en la figura 63 los grados de variabilidad que presenta la variable en el área de estudio como variable regionalizada, donde se puede observar el error en la estimación de las medidas, por ejemplo según la barra de contornos se determina que el error máximo en la predicción de la variable temperatura fue de aproximadamente $1^{\circ}C$, esto en las esquinas superior en inferior derecha del área donde se llevó a cabo la estimación y en las esquinas superior en inferior izquierda no supera los $0.8^{\circ}C$. En las zonas intermedias de los nodos se observa un error de estimación no mayor a los $0.6^{\circ}C$.

De la misma forma se presentan las estimaciones y el variograma para la variable humedad en las figuras 64 y figura 65, donde se pueden observar nodos sensando humedades mayores a 60% como los mostrados en los círculos negros, ya que las medidas fueron tomadas en días lluviosos y muchos de los nodos se ubicaron en arbustos y prados húmedos.

Figura 63 Estimación de humedad

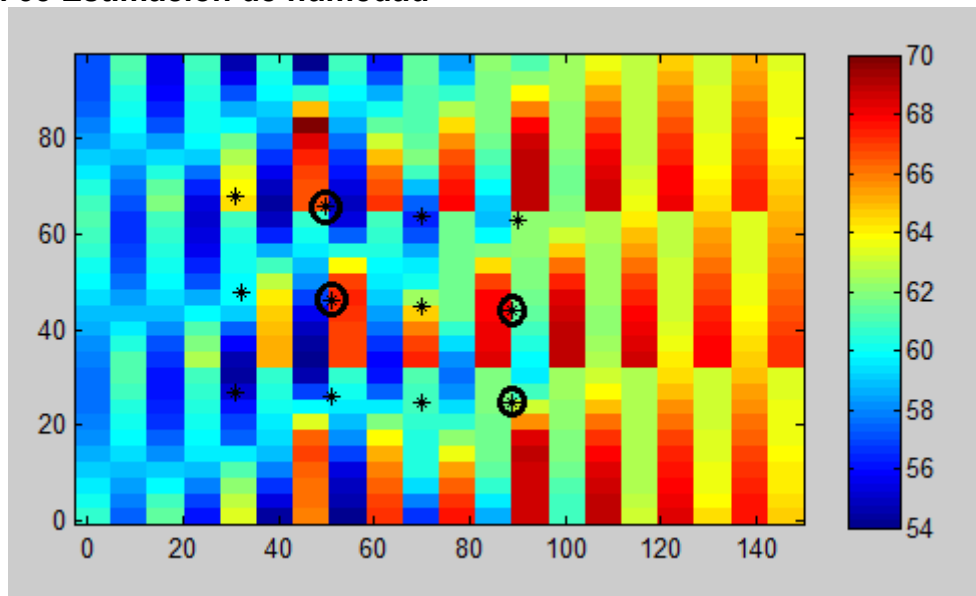
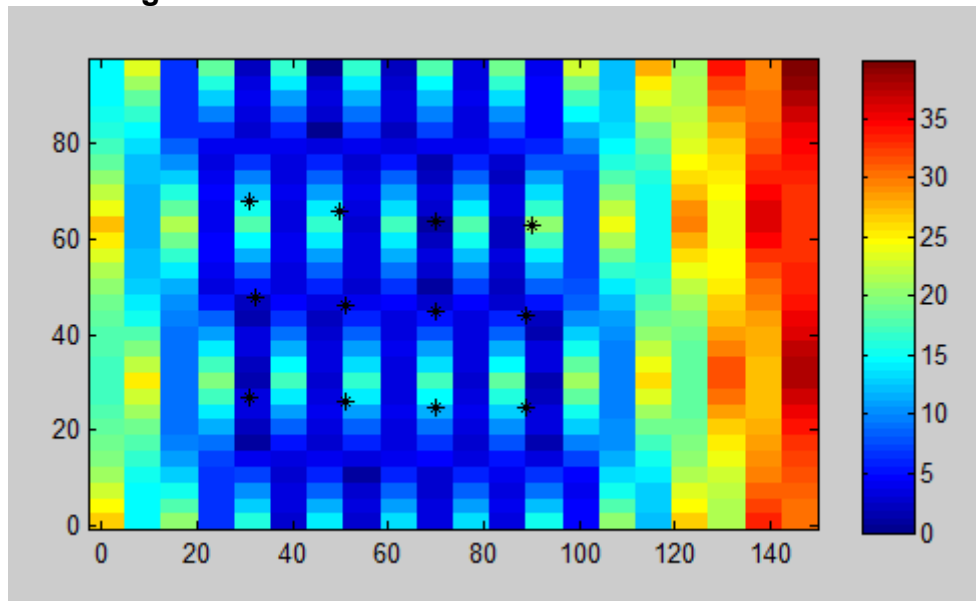


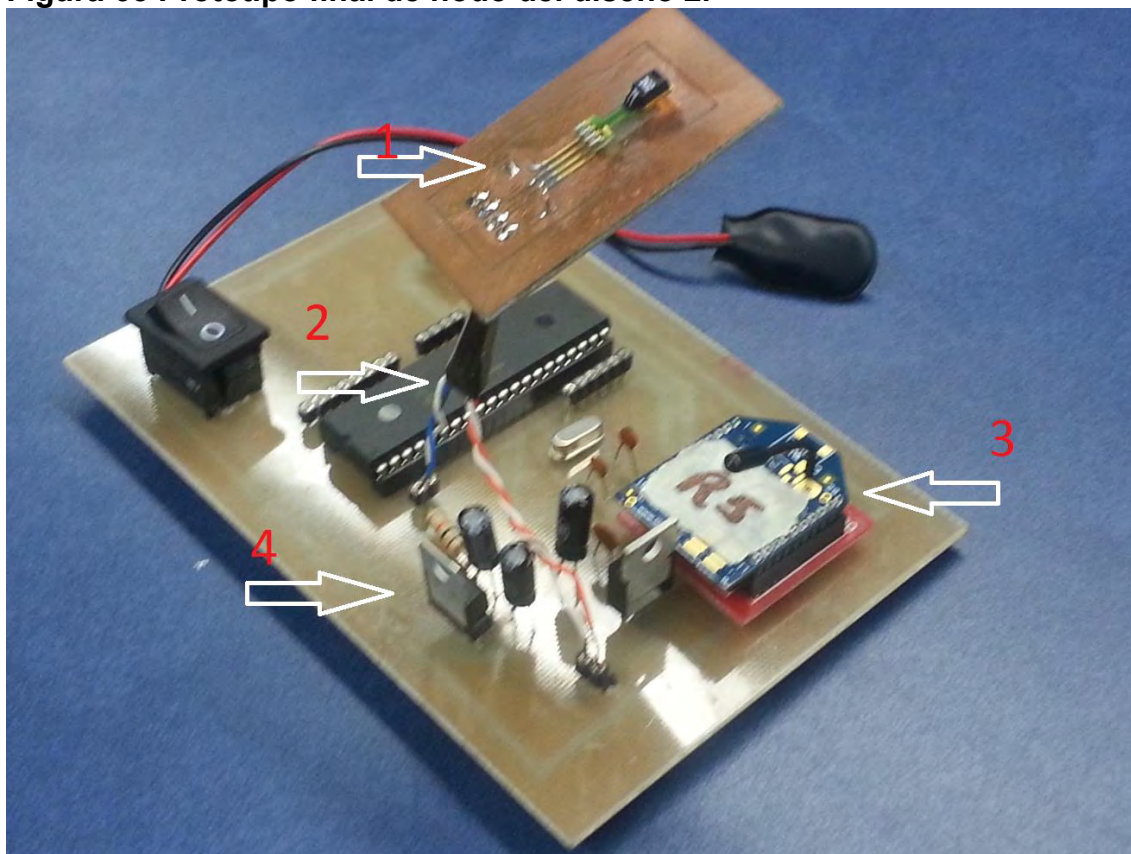
Figura 64 Variograma de humedad



Por último se puede observar como la humedad en la figura 65 varía de la misma forma que la temperatura en la figura 63, ya que esta es una variable proporcionalmente dependiente de la temperatura.

En la figura 66 se observa el prototipo final del diseño 2 utilizado en el caso de estudio presentado anteriormente el cual se realizó en el área especificada en la figura 61.

Figura 65 Prototipo final de nodo del diseño 2.



En la figura 66 se pueden observar una numeración, los cuales representan los módulos que componen el Nodo, en el número uno se representa, la etapa de sensado la cual contiene el sensor (SHT71), en el número dos está el módulo del microcontrolador (PIC16F887), en el número tres se presenta el transceptor (Modulo Xbee) y en el número cuatro se encuentra la etapa de alimentación del Nodo.

9. CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas durante el desarrollo de este trabajo fueron las siguientes:

- Es muy importante asegurarse de poder adquirir todos los componentes demandados en un determinado diseño, para de esta manera no incurrir en la necesidad de tener que realizar otros diseños alternativos.
- Se pudo validar el uso del estándar zigbee/802.15.4 para abordar soluciones de monitorización en grandes áreas y espacios abiertos, en las cuales la escalabilidad de la red y el bajo consumo de potencia de los nodos son parámetros relevantes en el diseño.
- Las bases de datos relacionales de tipo dinámica satisfacen las necesidades de las aplicaciones de monitorización y análisis de variables ambientales como las planteadas por los investigadores del grupo de investigación GEADES de la UAO, ya que permite que la información almacenada sea modificada posteriormente, realizando operaciones como actualización, borrado y adición de datos, además de las operaciones fundamentales de consulta.
- La selección del lenguaje de programación SQL para el desarrollo de la base de datos provee una gran facilidad de asociación con otras tecnologías, como fue el caso de la página Web la cual no fue necesario programar en su totalidad, sino que por medio de SQL se realizaron las consultas directamente en la base. Esto facilita la portabilidad y mantenimiento de los desarrollos.
- La utilización de kriging como método de estimación para este proyecto le brinda la posibilidad al sistema de ser aplicable a otro tipo de entornos de monitoreo y diferentes tipos de cultivos, debido a que el algoritmo de estimación se basa en las medidas puntuales entregadas por los nodos que se encuentran ubicados estratégicamente dentro el cultivo o entorno a sensor.
- Gracias al método de estimación kriging es posible disminuir la cantidad de nodos a utilizar, ya que el algoritmo tiene como objetivo principal disminuir la varianza del error entre las medidas puntuales, esto se logra a partir de la elección del variograma más adecuado para la aplicación. Es importante resaltar que la elección del variograma influye considerablemente en la precisión de las estimaciones y una mala escogencia de este parámetro puede generar unas predicciones totalmente erradas.
- Por medio de la varianza de los datos se pudo analizar el comportamiento de la variable en la zona de monitoreo y de este forma determinar una

alternativa para la ubicación de nodos en puntos donde la variación de la variable sea crítica, o se presenten cambios significativos.

- Para permitir los enlaces entre nodos en la formación de la red, fue necesario establecer un parámetro para la distancia máxima de separación entre nodos, que garantizara la sostenibilidad de la comunicación entre estos.
- Para lograr estimar efectivamente la cantidad de nodos necesarios para cubrir el área de monitoreo fue necesario establecer un criterio de comunicación entre nodos, que permitiera analizar la distancia máxima a la cual se permite dicha comunicación, para definir el área de intersección entre nodos y así relacionarla con el área total de monitoreo.
- Los resultados experimentales y de simulación son herramientas que utilizadas complementariamente permitieron validar el desarrollo realizado para garantizar el cumplimiento de los requisitos propuestos en este trabajo.

10. TRABAJO FUTURO

Partiendo de los resultados obtenidos durante el desarrollo de este proyecto, se abren interesantes líneas de trabajo para profundizar en el estudio de tecnologías de redes de sensores basadas en el estándar ZIGBEE/ IEEE 802.15.4, como pueden ser las siguientes:

- Dentro del trabajo futuro para este trabajo está la idea de agregar al diseño un módulo GPS que provea las coordenadas en las que está ubicado cada nodo y a su vez dichas coordenadas ser enviadas dentro de la trama que envía cada nodo junto con las medidas de las variables y la MAC de cada nodo
- Se pretende incluir algún tipo de análisis previo con los datos almacenados que han sido enviados desde la red, por ejemplo algún cálculo estadístico relevante en el caso que se aplique.
- También es recomendable para incrementar la robustez de la red utilizar la memoria del microcontrolador de cada nodo y así poder almacenar mediciones localmente.
- Es posible mejorar la versatilidad de los nodos individuales implementando un mecanismo de configuración a parte del convencional (programación directa de la memoria flash del microcontrolador) ya sea mediante la adición de un puerto para comunicación externa o buscar la manera de realizar la configuración del nodo inalámbricamente.

BIBLIOGRAFÍA

ALLIANCE, Z. ZigBee-PRO Stack Profile: Platform. Saqn Ramón California: 2008

ALVAREZ, S. (s.f.). DESARROLLO WEB. [en línea][consultado el Abril de 2012, Disponible en internet: <http://www.desarrolloweb.com/articulos/modelos-base-datos.html>

AREVALO BRAZAS, S. Programacion de un nodo conmutador para la gestion remotade redes 802.15.4/zigbee. Màlaga: Universidad de màlaga. 2011

BLANDON ANDRADE, J., & LÒPEZ SOTÈLO, J. (BIO- ROUTE: Un simulador para redes de sensores inalambricos. educacion EN INGENIERIA. 25 Mayo 2012

CALI, J. B. (s.f.). JARDIN BOTANICO DE CALI. . [en línea][consultado el Diciembre de 2012, Disponible en internet:<http://www.jardinbotanicocali.org/eljardin.html>

CERVIN, A., HENRIKSSON, D., & OHLIN, M. True time 2.0 beta - reference manual. lund university. 2010

CÓmo funciona el filtro pi. (s.f.). . [en línea][consultado el Abriril de 2012, Disponible en internet:<http://dc457.4shared.com/doc/ArvAwqs5/preview.html>

DIGI. (s.f.). DATASHEET. . [en línea][consultado elf ebrero de 2012, Disponible en internet:de XBEE/XBEE PRO RF MODULES: <http://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Zigbee/XBee-Datasheet.pdf>

DIGI. (s.f.). PRINCIPALES DIFERENCIAS ENTRE SERIE XBEE 1 VS EL XBEE SERIE 2. . [en línea][consultado el enero de 2013, Disponible en internet:<http://www.digi.com/support/kbase/kbaseresultdetl?id=2213>

EL ESTANDAR IEEE 802.15.4. (s.f.). . [en línea][consultado el Octubre de 2012, Disponible en internet:http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/archundia_p_fm/capitulo4.pdf

FREESCALE. (s.f.). MC1323x 2.4GHz IEEE 802.15.4/ZIGBEE SYSTEM-ON-CHIP SOLUTION.[en línea][consultado el Abril de 2012, Disponible en internet:http://cache.freescale.com/files/wireless_comm/doc/fact_sheet/MC1323XFS.pdf?fp=1

FREESCALE. (s.f.). MICROCONTROLLERS. en línea][consultado el Abril de 2012, Disponible en internet:http://www.freescale.com/webapp/sps/site/homepage.jsp?code=PCMC_R01

GARBARINO, J. (s.f.). Protocolos para redes inalámbricas de sensores. en línea][consultado el Noviembre de 2012, Disponible en internet:<http://materias.fi.uba.ar/7500/Garbarino.pdf>

GIRALDO HENAO, R. (s.f.). Introduccion a la geoestadistica. bogota: universidad nacional de colombia.

H. ISAAKS, E., & MOHAN SRLVASTAVA, R. APPLIED GEOSTATISTICS. 1989

INALAMBRICA, X. M. (s.f.). en línea][consultado el Marzo de 2013, Disponible en internet:<http://www.xbee.cl/>

INSTRUMENT, T. (s.f.). TEXAS INSTRUMENT. en línea][consultado el Noviembre de 2012, Disponible en internet:<http://www.ti.com/product/cc2520>

INSTRUMENT, T. (s.f.). TI E2E COMMUNITY. en línea][consultado el Enero de 2012, Disponible en internet:http://e2e.ti.com/support/low_power_rf/f/158/t/94755.aspx

INTRUMENT, T. (s.f.). MICROCONTROLADORES. en línea][consultado el Abril de 2012, Disponible en internet:http://www.ti.com/ww/mx/prod_mcu.html

KARL, H., & WILLIG, A. Protocols and architectures for wireless sensor network. wiley. 2005

LANGENDOEN, K., Baggio, A., & Visser,O. Murphy Loves Potatoes: experiences from a pilot sensor network deployment in precision agriculture.2006

PARALLEL and Distributed Processing Symposium, 2006. IPDPS 2006. 20th International., 1-4244-0054-6.

LOPEZ, J., SOTO, F., SUARDIAZ, J., SANCHEZ, P., IBORRA, A., & VERA, J. (2009). Wireless Sensor Networks for horticulture in Southern Spain. Computers and Electronics in Agriculture 68, 25-35.

MARTINEZ, D., SIMO, J., Blandes, F., & CRESPO, A. Wireless Sensor and Actuator Networks: Characterization and Case study for Confined Spaces Healthcare and control Applications. Scalable Computing: Practice and Experience, Scientific International Journal for Parallel and Distributed Computing, 291-305, Volume 10, no.3 <http://www.scpe.org>. ISSN: 1895-1767. September, 2009.

MASTERMAGAZINE. (s.f.). en línea][consultado el Febrero de 2013, Disponible en internet: <http://www.mastermagazine.info/termino/6937.php>

MICROCHIP. (s.f.). en línea][consultado el Abril de 2012, Disponible en internet: http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=2551

MICROCHIP. (s.f.). DATASHEET - PIC18F87K22 FAMILY. en línea][consultado el Abril de 2012, Disponible en internet: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39960d.pdf>

MICROCHIP. (s.f.). PIC10F200/202/204/206 DATASHEET. en línea][consultado el Abril de 2012, Disponible en internet: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41239D.pdf>

MICROCHIP. (s.f.). PIC18F47J13 FAMILY DATASHEET. Recuperado el ABRIL de 2012, de <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39974A.pdf>

MODELO DE BASES DE DATOS. (s.f.). en línea][consultado el Abril de 2012, Disponible en internet: <http://es.scribd.com/doc/17170125/Modelos-de-Bases-de-Datos>

MORALES, R. (15 de FEBRERO de 2012). YOUTUBE. Netbeans Guardar datos a MySql Java Video 2: en línea][consultado el Abril de 2012, Disponible en internet: <http://www.youtube.com/watch?v=hBewvo8KS6E>

MORALES, R. (13 de FEBRERO de 2012). YOUTUBE. en línea][consultado el Abril de 2012, Disponible en internet: de Netbeans Objeto Conectar a MySql Java Video 1: <http://www.youtube.com/watch?v=ySzC78xloxY>

MORALES, R. 15 de FEBRERO de 2012. YOUTUBE. Netbeans Mostrar y Filtrar datos a MySql Java Video 3: en línea][consultado el Abril de 2012, Disponible en internet: <http://www.youtube.com/watch?v=xuO94ROMCsE>

MOTEIV. (s.f.). DATASHEET. en línea][consultado el Enero de 2013, Disponible en internet: <http://www.moteiv.com/products/docs/telos-revb-datasheet.pdf>

NAVARRO ALCALDE, A., & CABALLERO TRULLENQUE, El sistema de adquisicion y explotacion de datos basados en una red de sensores ieee 802.15.4. 3. 2010

PACKETMICRO. (s.f.). ZigBee (IEEE 802.15.4) Module. en línea][consultado el Febrero de 2012, Disponible en internet:, de <http://www.packetmicro.com/ZigBee.html>

PEÑA PARRA, M. Diseño e implementacion de una red de sensores inalambrica para el monitoreo de temperatura y humedad durante el cultivo del champiñon. cali-colombia: universidad autonoma de occidente.2011-

ROBOTICS, A. (s.f.). XBEE. [en línea][consultado en Febrero de 2012, Disponible en internet:, <http://all-robotics.com/www/productos/controladores/93-xbee>

ROJAS, C. (2013). MOODLE - UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE. . [en línea][consultado en Enero de 2013, Disponible en internet:, de SISTEMAS DE MEDICION Y ACTUACION: <http://augusta.uao.edu.co/moodle/mod/resource/view.php?id=101114>

ROJAS, C. (s.f.). MOODLE Universidad autonoma de occidente. de características dinamicas en sistemas de instrumentacion: . [en línea][consultado en Febrero de 2012, Disponible en internet: <http://augusta.uao.edu.co/moodle/mod/resource/view.php?id=102386>

ROJAS, C. (s.f.). Moodle - Universidad autonoma de occidente. recuperado el enero de 2013, de características estaticas en sistemas de instrumentacion: . [en línea][consultado en Febrero de 2012, Disponible en internet:<http://augusta.uao.edu.co/moodle/mod/resource/view.php?id=102345>

SÁNCHEZ, J. (s.f.). Principios sobre bases de datos relacionales. . [en línea][consultado en Febrero de 2012, Disponible en internet:<http://www.jorgesanchez.net/bd/bdrelacional.pdf>

SENSIRION, T. (s.f.). DATASHEET SHT71. . [en línea][consultado en Febrero de 2012, Disponible en internet:http://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dok

VALVERDE ALCALA, J.. Diseño y despliegue de una red de sensores inalámbrica. aplicacion para el control medioambiental en la industria alimentaria. madrid: industriales etsii – UPM.2010

VALVERDE REBAZA, J. (2007). EL ESTANDAR INALAMBRICO ZIGBEE. . [en línea][consultado en Octubre de 2012, Disponible en internet:<http://www.seccperu.org/files/ZigBee.pdf>

WIKIPEDIA. (s.f.). la enciclopedia virtual. MODELO RELACIONAL: [en línea] Florida [consultado en Febrero de 2012, Disponible en internet: http://es.wikipedia.org/wiki/Modelo_relacional

WIKIPEDIA. (s.f.). Recuperado el ABRIL de 2012, de BASE DE DATOS: [en línea] Florida [consultado en Febrero de 2012, Disponible en internet: http://es.wikipedia.org/wiki/Base_de_datos

Wireless Sensor Network. (s.f.). [en línea] Florida [consultado en Febrero de 2012, Disponible en internet: <http://www.mfbarcell.es/conferencias/wsn.pdf>

YANG, X., & WANG, L.. Spatial analysis and hazard assessment of mercury in soil around the coal-fired power plant. Baoji, China: Springer-Verlag.2007

ZIGBEE, A. (s.f.). EL ESTANDAR ZIGBEE. [en línea] Florida [consultado en Enero de 2013, Disponible en internet: <http://dSPACE.UPS.EDU.ec/bitstream/123456789/206/4/Capitulo%203.pdf>

ANEXOS

Anexo A: Conceptos de instrumentación

Con el fin de aclarar los conceptos que se requieren para la selección óptima de los componentes, como los sensores o hasta el mismo microcontrolador, a continuación se presentan algunas definiciones.

- **Sensor.**

Es un dispositivo formado por células sensibles a las variaciones de una magnitud física como la temperatura, la posición o una concentración química, que las convierte en señales útiles para sistemas de medición o de control.

- **Transductor.**

Es un dispositivo de comportamiento generalmente lineal, que convierte una variable de un tipo de energía en otra variable del mismo tipo o de otro tipo de energía, generalmente eléctrica, para alimentar a instrumentos de lectura, registro o controladores.

La señal de respuesta de un sensor o de un transductor generalmente es de bajo nivel, razón por la cual debe ser amplificada por un circuito electrónico, teniendo especial cuidado de aislarla o separarla de señales indeseables como ruido o interferencia.

- **Exactitud de un Medidor.**

Este término indica cuanto difiere la salida de un medidor, al compararla con el valor real de la variable física de interés. El término es utilizado también para expresar el máximo error global que se espera de un dispositivo al medir una variable de las siguientes maneras:

Exactitud (Expresada en términos del error introducido)

$$\text{Porcentaje Error Maximo} = \frac{\text{Valor indicado} - \text{Valor real}}{\text{Valor real}} 100\%$$

Exactitud (Expresada en otros términos de la escala)

$$\text{Porcentaje Error Maximo} = \frac{\text{Valor medido} - \text{Valor real}}{\text{Maximo valor de la escala}} 100\%$$

- **Precisión.**

Es la medida de la dispersión de una serie de datos y no una medida de la exactitud de ellos. La precisión de un instrumento depende de la resolución y de la estabilidad. Es posible tener un instrumento preciso y no exacto, pero no es posible tener un instrumento exacto que no sea preciso. La figura se, ilustra esquemáticamente la diferencia entre los dos términos.

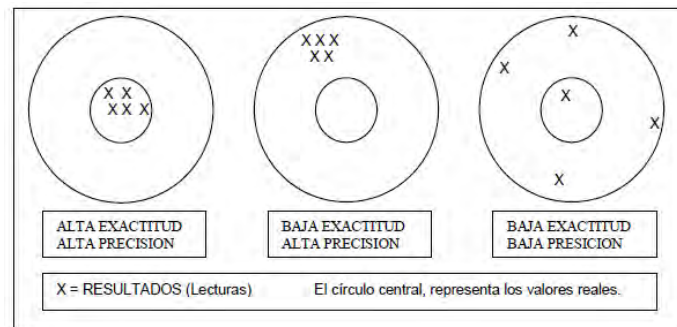


Figura Precisión VS Exactitud

Es un término que muchas veces se confunde con exactitud, pero una medición precisa puede no ser una medición exacta. Si el medidor está expuesto a la misma entrada en varias ocasiones y los resultados tienden a permanecer estrechamente juntos, entonces se dice que el instrumento es de alta precisión.

Si un voltímetro de buena calidad se utiliza para medir una tensión constante en varias ocasiones y dentro de la exactitud del instrumento, todas las lecturas son iguales o casi iguales, entonces se dice que se han obtenido lecturas precisas. Suponga sin embargo, que cuando sitúe el voltímetro lejos del sitio de prueba, se notó que el indicador está desplazado y no marca el cero. Todas las lecturas obtenidas, pudieran ser precisas pero no exactas.

- **Rango**

Conjunto de valores de alguna variable que se pueden procesar a través de un sistema de instrumentación. Viene expresado o establecido por los valores extremos [35].

- **Resolución**

Es el más pequeño cambio en la señal de entrada, que puede ser detectado con certeza, porque ocasiona un cambio en la señal de salida o respuesta de un instrumento. Esta característica es inherente a cada sistema y sólo puede ser cambiada por un rediseño.

La resolución generalmente se expresa como un porcentaje del alcance o span de la medida. En algunos casos es limitada por la sensibilidad del acondicionador de señal asociado y podrá ser mejorada empleando un mejor acondicionamiento.

En sistemas análogos, la resolución del sistema, está usualmente determinada por el más pequeño cambio medible en la señal de salida análoga del sistema de medición.

En sistemas digitales, la resolución es una cantidad perfectamente definida que es simplemente el cambio en la variable dinámica, representada por el cambio de un bit en la palabra binaria de salida. En éstos casos, la resolución puede ser mejorada, sólo con una codificación diferente, o adicionando más bits a la palabra digital.

- **Variable física a medir.**

Es la característica principal y el parámetro dinámico a medir de un proceso. Como depende de otros parámetros del mismo proceso, puede sufrir cambios debido a agentes diferentes. Generalmente, se selecciona uno de estos otros parámetros para que actúe como variable manipulada o parámetro controlador, cuando se quiere controlar la variable. [37]

La variable puede ser física, mecánica, térmica, química o eléctrica o de otro tipo, entre las cuales podemos encontrar:

- Aceleración Campos de Audio y Ruido
- Concentración de gases Conductividad
- Consistencia Deformación-torsión
- Densidad-peso específico
- Fuerza-carga-peso
- Humedad relativa-punto de rocío
- Luz
- Nivel Oxígeno-reducción
- Permitividad-capacitancia
- Punto de rocío Químicas
- Radiación infrarroja
- Temperatura

Anexo B. Métodos de estimación geoestadística.

En los procesos naturales, las variables físicas y biológicas del entorno generalmente muestran una importante diversidad espacial. Esto no significa que sea imposible definir un patrón de distribución. Por el contrario, en la gran mayoría de procesos naturales, existe una continuidad espacial entre las distintas localizaciones de las variables físicas y biológicas del entorno.

El desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la aplicación de la geoestadística, ha supuesto un nuevo impulso al análisis de la distribución espacial aplicada a la ecología y a las ciencias ambientales. Un SIG es un conjunto de programas informáticos que sirven para captar, almacenar, recuperar, transformar, mostrar y analizar diversos tipos de datos espaciales.

Los datos georreferenciados, es decir, con unas coordenadas conocidas con respecto a un origen predeterminado, pueden incorporarse a un SIG para generar mapas temáticos o coberturas. Por ejemplo, los tipos de suelos, las condiciones climáticas de una zona en particular y de cultivos o clases de cultivos, y las densidades de insectos pueden mostrarse en unos mapas independientes. Además, los mapas temáticos pueden combinarse con el fin de analizar las posibles interacciones entre las diversas variables. Aunque los SIG han permitido a los investigadores la manipulación de datos espaciales, la caracterización y la modelización de los patrones de distribución espacial es muy poco factible si no se cuenta con un programa estadístico adecuado. La geoestadística es la herramienta fundamental para ese trabajo. [36]

- **Geoestadística**

La Geoestadística implica el análisis y la estimación de fenómenos espaciales o temporales, tales como: calidades de metal, porosidades, concentraciones de contaminantes. La palabra Geoestadística es normalmente asociada con la Geología, desde que esta ciencia tiene sus orígenes en la minería.

Hoy en día, la Geoestadística es un nombre asociado con una clase de técnicas, para analizar y predecir los valores de una variable que está distribuida en espacio o tiempo. Se asumen tales valores implícitamente para ser puestos en correlación entre sí, y el estudio de la correlación normalmente se llama un "análisis estructural" o un "Variograma". Después del análisis estructural se hacen estimaciones a las situaciones de los sectores no muestreados usando la técnica de interpolación "Kriging".

La Geoestadística, tiene como objetivo el caracterizar e interpretar el comportamiento de los datos que están distribuidos espacialmente "variables regionalizadas".

Los pasos principales de un estudio Geoestadístico son:

- Análisis de los datos exploratorios.
- Análisis Estructural (Cálculo y modelación de los Variogramas).
- Estimaciones (Kriging o simulaciones).
- Análisis estructural

En geoestadística los datos se observan en u localizaciones de un conjunto $D \in \mathbb{R}^d$ donde d indica la dimensión del espacio. Las localizaciones se expresan en dos o tres coordenadas espaciales, como por ejemplo, longitud, latitud, y/o altitud. Las observaciones se toman en cada localización y se consideran como una realización de un proceso estocástico espacial denotado generalmente por $Z(u)$.

La función de distribución acumulada de una variable aleatoria continua dependiente de la localización espacial u , $Z(u)$ viene definida por:

$$F(u; z) = P\{Z(u) \leq z\} \quad (1)$$

Siendo P la función de probabilidad asociada. En la práctica se suele trabajar con información de n datos, por lo que la variable aleatoria se suele denotar por $Z(u_i), i = 1, \dots, n$ y en ese caso se trabaja con la función de distribución acumulada condicional dada por:

$$F(u; k|n) = P\{Z(u) \leq z|n\} \quad (2)$$

En geoestadística es importante modelar el grado de correlación o dependencia espacial entre una cierta variable $Z(u_i), i = 1, \dots, n$.

- Variable regionalizada

Una variable medida en el espacio de forma que presente una estructura de correlación, se dice que es una variable regionalizada. De manera más formal se puede definir como un proceso estocástico con dominio contenido en un espacio $D \in \mathbb{R}^d$. En términos prácticos $Z(u)$ puede verse como una medición de una variable aleatoria, como por ejemplo concentración de un contaminante en un punto u de una región de estudio. Un proceso estocástico es una colección de variables aleatorias indexadas, esto es, para cada u en el conjunto de índices D , $Z(u)$ es una variable aleatoria. En el caso de que las mediciones sean hechas en una superficie, entonces $Z(u)$ puede interpretarse como la variable aleatoria asociada a ese punto del plano. Estas variables aleatorias pueden representar la magnitud de una variable ambiental medida en un conjunto de coordenadas de la región de estudio.

- Estacionariedad

La variable regionalizada es estacionaria si su función de distribución conjunta es invariante respecto a cualquier translación del vector h , o lo que es lo mismo, la función de distribución del vector aleatorio $\vec{Z}(x) = [Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_n)]^T$ es idéntica a la del vector $\vec{Z}(x) = [Z(x_1 + h), Z(x_2 + h), \dots, Z(x_n + h)]^T$ para cualquier h . La teoría geoestadística se basa en estos conceptos. [14]

- Variograma

Es un estimador de la varianza poblacional, por lo tanto la población debe tener una tendencia de estacionariedad; el variograma está relacionado con una dirección y distancia (h), es la principal herramienta básica que da soporte a las técnicas de Kriging, permite representar cuantitativamente la variación de un fenómeno regionalizado en el espacio. El variograma modela la forma como dos valores en el espacio o tiempo se ponen en correlación.

En el análisis geoestadístico, el variograma es utilizado para describir la dependencia espacial entre observaciones puntuales en el plano donde se analizó el verdadero variograma, el cual generalmente es desconocido. Por lo tanto, una estimación del variograma se puede calcular a través de observaciones conocidas.

Esto se logra en primer lugar determinando el variograma experimental, propuesto por la semivarianza:

$$\gamma(h) = 0.5(Z_x - Z_{x+h})$$

Donde Z_x es el valor observado en el punto x y Z_{x+h} es un valor observado en otro punto dentro de la distancia h .

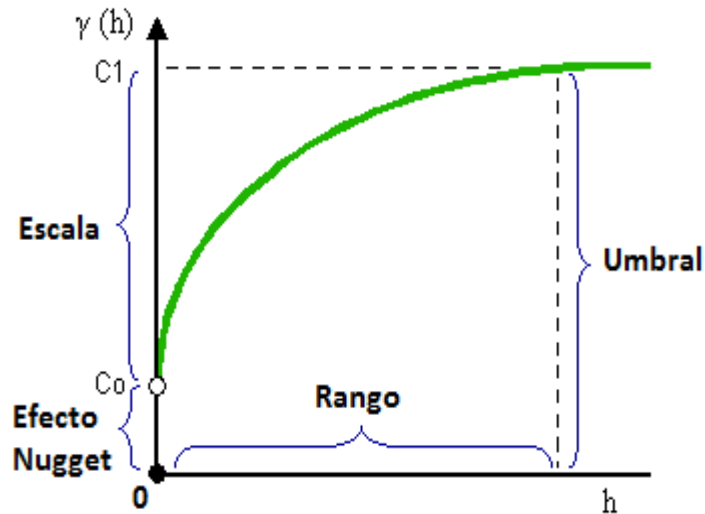
$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z_{x_i} - Z_{x_i+h})^2$$

Dónde:

$\gamma(h)$: es el variograma teórico

$N(h)$: es el número de puntos x_i , $x_i + h$ separados a una distancia h .

Figura Gráfico de variograma



El Variograma está conformado por los siguientes elementos:

- **Efecto Nugget (C_0):** Generalmente el variograma no tiende a cero como lo hace la distancia h , el *Efecto Nugget* indica la discontinuidad del semivariograma para distancias que sean menores que la menor distancia que se da entre los puntos muestrales. Parte de esta discontinuidad puede también ser dividida en errores de medición, una pobre precisión analítica, o más a menudo por mineralización altamente errática a baja escala.
- **Umbral ($Sill = C_1 + C_0$):** Es el valor alcanzado por el variograma en el *Rango*. El Sill de un variograma, puede ser denotado como la varianza de la muestra.
- **Escala (C_1):** Es el valor tal que; $C_1 + C_0 = Sill$.
- **Rango:** Es la distancia dentro de la cual, las muestras están correlacionadas espacialmente.
- Modelos teóricos del variograma

Son varios los modelos básicos de los Variogramas, que son capaces de explicar los diferentes comportamientos que pueden presentar las variables regionalizadas; entre los modelos más usuales están el modelo de variograma Nugget Effect, modelo de variograma esférico y el modelo de variograma exponencial.

- Modelo de variograma NUGGET EFFECT

Es la estructura más básica del variograma indicando falta de estructura espacial. Viene dado por:

$$\gamma(|h|) = \begin{cases} 0, & |h| = 0 \\ 1, & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

- Modelo de variograma esférico

Está definido por un rango actual α , una varianza a priori C_1 y un efecto nugget C_0

$$\gamma(|h|) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left[1.5 \frac{h}{\alpha} - 0.5 \left(\frac{|h|}{\alpha} \right)^3 \right], & |h| \leq \alpha \\ C_0 + C_1 h, & |h| \geq \alpha \end{cases}$$

- Modelo de variograma exponencial

El modelo es definido por un rango efectivo α (rango integral $\alpha/3$), una varianza a priori C_1 y un efecto nugget C_0

$$\gamma(|h|) = C_0 + C_1 * \left[1 - e^{-\frac{3|h|}{\alpha}} \right]$$

Todos los modelos anteriores excepto el lineal son acotados, lo que significa que el umbral (sill) se alcanza realmente en el límite a una cierta distancia marcada por el rango. Además se tiene las siguientes observaciones:

- Para el modelo de efecto nugget, el sill es alcanzado tan pronto la distancia se hace positiva.
- El modelo esférico alcanza realmente el sill a una distancia equivalente a su rango.
- Los modelos exponenciales y gaussiano alcanzan asintóticamente el sill, definiéndose en un rango practico como aquella distancia para la que el modelo encuentra al 95% del sill.